

44
SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886

COMMÉMORATION DU CINQUANTENAIRE

DES

PREMIÈRES RÉALISATIONS

DE TRANSMISSION D'ÉNERGIE PAR L'ÉLECTRICITÉ

Travaux et expériences de Marcel DEPREZ,
sur la transmission d'énergie par l'électricité en France.

Travaux de Lucien GAULARD,
sur les transformateurs statiques
et sur la transmission d'énergie par courant alternatif.

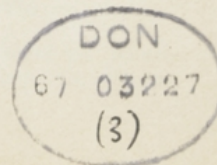
Publié avec le gracieux concours
de la
" REVUE GÉNÉRALE DE L'ÉLECTRICITÉ "

12, place de Laborde, PARIS (8^e)

1935



F₁₄₂
CP



4° V
25840

7756

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS

Société reconnue d'utilité publique par décret en date du 7 décembre 1886

COMMÉMORATION DU CINQUANTENAIRE DES PREMIÈRES RÉALISATIONS DE TRANSMISSION D'ÉNERGIE PAR L'ÉLECTRICITÉ

Travaux et expériences de Marcel DEPREZ,
sur la transmission d'énergie par l'électricité en France.

Travaux de Lucien GAULARD,
sur les transformateurs statiques
et sur la transmission d'énergie par courant alternatif.

Publié avec le gracieux concours
de la
" REVUE GÉNÉRALE DE L'ÉLECTRICITÉ "
12, place de Laborde, PARIS (8^e)
1935

SOMMAIRE

Célébration du cinquantenaire des expériences de Marcel Deprez et des travaux de Lucien Gaulard (1885-1935), p. 3.

Marcel Deprez et les origines de l'électrotechnique, par Ad. CURCHOD, p. 11.

Une page d'histoire : Marcel Deprez, d'après Joseph Bertrand, p. 19.

Comptes rendus des expériences officielles de transmission d'énergie électrique effectuées par Marcel Deprez, p. 31.

Bibliographie des travaux et expériences de Marcel Deprez jusqu'à la fin de 1885, p. 38.

Récompenses et distinctions honorifiques décernées à Marcel Deprez, p. 47.

En marge des expériences de Marcel Deprez entre Creil et Paris : l'installation de transmission et de distribution d'énergie électrique à Bourganeuf (Creuse), p. 47.

La vie et l'œuvre de Lucien Gaulard, réalisateur du premier transformateur à courant alternatif, par J. BETHENOD, p. 49.

A propos du cinquantenaire des expériences de Creil : l'état actuel de la technique des réseaux de transmission d'énergie électrique, par J. FALLOU, p. 57.

Célébration du cinquantenaire des expériences de Marcel Deprez et des travaux de Lucien Gaulard

(1885-1935)

A l'occasion du cinquantenaire des expériences de Marcel Deprez qui avaient montré la possibilité de transmettre électriquement à des distances d'environ 50 km, entre Creil et Paris, une puissance de l'ordre de 50 à 100 ch, expériences qui commencèrent à la fin de l'année 1885, la Société française des Electriciens a organisé, le 30 novembre 1935, une manifestation au Conservatoire national des Arts et Métiers, établissement auquel Marcel Deprez fut attaché comme professeur, dès 1890, date de la création de la chaire d'électricité industrielle, La Société française des Electriciens décida d'associer au nom de Marcel Deprez celui d'un autre pionnier français de l'électrotechnique, savoir, Lucien Gaulard, premier réalisateur du transformateur statique qu'il avait pu montrer en fonctionnement à l'Exposition internationale de Turin, en 1884. En évoquant en une même cérémonie commémorative le souvenir de Marcel Deprez et celui de Lucien Gaulard, la Société française des Electriciens a tenu à montrer que l'histoire efface les différences de formation d'esprit, de caractère et même les divergences de vues dans les conceptions qui peuvent exister entre deux individus, lorsque ces individus ont droit à la reconnaissance de leurs descendants ; Marcel Deprez, pionnier du courant continu, Lucien Gaulard, pionnier du

courant alternatif, deux Français, devaient se retrouver unis dans le sentiment d'admiration et de gratitude qu'a tenu à leur exprimer la Société française des Electriciens.

Au programme de la célébration de cet anniversaire figuraient la séance solennelle au Conservatoire national des Arts et Métiers, à laquelle il a été fait allusion ci-dessus, et un banquet à la Salle Hoche.

Séance solennelle au Conservatoire national des Arts et Métiers. — Cette séance eut lieu en présence de M. Albert Lebrun, Président de la République française, sous la présidence de M. Louis Marin, ministre d'Etat. Il est inutile d'insister sur le caractère que donnait à cette cérémonie la présence du Chef de l'Etat ; elle constituait la manifestation la plus imposante, et en même temps la plus précieuse pour la Société française des Electriciens, de l'étendue et de la portée de l'œuvre entreprise par les deux pionniers de l'électrotechnique dont le souvenir était célébré en cette journée du 30 novembre 1935.

Au début de la cérémonie M. L. NICOLLE, directeur honoraire au Ministère du Commerce et de l'Industrie, directeur du Conservatoire national des Arts et Métiers, prononça une allocution dont voici le texte :

Le Conservatoire national des Arts et Métiers est infiniment reconnaissant à M. le Président de la République française d'avoir su trouver une heure au milieu de tant d'obligations et de soucis pour rehausser de sa présence, avec M. Louis Marin, ministre d'Etat, la célébration du cinquantième des expériences de Marcel Deprez, premier titulaire de la chaire d'électricité industrielle, créée, pour lui, en 1890 au Conservatoire.

Pendant plus d'un quart de siècle Marcel Deprez a donné à cette chaire un lustre incomparable, déployant sans compter son esprit inventif dans le domaine de la mécanique. C'est lui qui, par les admirables expériences de Creil, a démontré la possibilité d'utiliser l'énergie d'un

courant électrique à grande distance du lieu où elle est produite, découverte qui eut un immense retentissement.

Si, en 1918, la mort ne l'avait frappé en pleine guerre, on peut être assuré que ses obsèques auraient réuni le concours des représentants des industries électriques du monde entier, payant ainsi à sa mémoire le tribut universel de reconnaissance qui lui est dû.

Grâce à l'initiative de la Société française des Electriciens, qui nous réunit solennellement aujourd'hui pour fêter le cinquantenaire de ces expériences mémorables, nous pouvons rendre l'hommage qu'il mérite à l'un des plus grands savants de notre pays.

Au nom du Conservatoire national des Arts et Métiers tout entier, j'avais le devoir de rappeler qu'il a été un des plus illustres professeurs de notre grand Etablissement scientifique, qui tient à honneur de garder pieusement son souvenir.

Je laisse à d'autres, infiniment plus qualifiés, comme M. Milon, président de la Société française des Electriciens, comme M. le professeur Chaumat, qui est le successeur immédiat de Marcel Deprez, dans la chaire d'électricité industrielle, le soin de préciser, avec une compétence que je n'ai point, toute l'importance scientifique et technique de l'œuvre de ce grand savant.

M. Louis Marin, ministre d'Etat, donna ensuite la parole à M. H. MILON, président de la Société française des Electriciens, qui s'exprima en ces termes :

Monsieur le Président de la République,
Monsieur le Ministre,
Mesdames, Messieurs,

Lorsqu'il y a quelques mois, la Société française des Electriciens conçut le projet de célébrer le cinquantenaire des expériences de Marcel Deprez sur le transport à distance de la force motrice par l'énergie électrique et des travaux de Lucien Gaulard sur les transformateurs, la plupart des membres de son comité ne prévoyaient sans doute pas toute l'ampleur que prendrait cette manifestation ni tout l'éclat que viendrait lui apporter la présence des plus hautes autorités de la République.

Mais à mesure que ceux de nos confrères, qui avaient bien voulu se charger de rappeler au public l'histoire trop oubliée de ces travaux, pénétraient plus avant dans leur sujet, celui-ci s'élargissait et s'approfondissait à leurs yeux de façon presque imprévue, tant par l'importance pratique des résultats de ces expériences elles-mêmes, que par les lueurs inattendues que le génie de leurs auteurs avait su projeter dans des domaines de l'électrotechnique encore bien peu explorés à cette époque ; l'enthousiasme des conférenciers se communiquait peu à peu à leurs collègues au point de leur faire accepter l'audacieuse pensée de solliciter le haut patronage du Président de la République.

Avec votre bonne grâce coutumière, vous avez bien voulu, M. le Président, nous accorder quelques minutes d'entretien, au cours desquelles M. Chaumat, grâce à la chaleur communicative issue d'une ardente conviction, sut éveiller en vous l'intérêt à la fois de l'ingénieur et de l'homme d'Etat sur la haute portée industrielle et sociale de l'œuvre de Marcel Deprez.

Une si belle cause, exposée avec tant d'ardeur, ne pouvait avoir que partie gagnée, et vous avez bien voulu accepter d'honorer de votre présence notre cérémonie. Je dois vous apporter ici, M. le Président, au nom de tous les membres de notre Société, l'hommage de notre sincère gratitude et de notre respectueux dévouement.

Je dois aussi exprimer toute notre reconnaissance à M. le ministre d'Etat Louis Marin, qui a bien voulu accepter de

présider cette cérémonie ; bien que ses préoccupations habituelles et ses devoirs d'homme d'Etat ne lui laissent guère le loisir de suivre l'évolution de nos diverses techniques, l'éminent sociologue que nous admirons en lui est trop curieux des différentes formes de l'activité humaine, pour ne point s'être intéressé de prime abord à cette commémoration d'une date si importante dans l'histoire du développement d'une de nos principales industries,

Je dois également remercier, au nom de notre Société, MM. les membres du Corps diplomatique, MM. les représentants des Corps élus et des nombreuses sociétés savantes françaises et étrangères, MM. les membres de l'Institut, de l'Etat-major général et les hauts fonctionnaires, qui ont bien voulu nous honorer de leur présence.

Enfin, je dois me faire l'interprète des sentiments de reconnaissance de notre Société envers le Conseil d'Administration du Conservatoire national des Arts et Métiers qui a bien voulu nous offrir l'hospitalité et nous prêter pour l'organisation de cette cérémonie le concours le plus libéral et le plus efficace.

De Marcel Deprez et de Gaulard même, je ne vous dirai rien, Messieurs, de peur de déflorer maladroitement le sujet des deux brillantes conférences que vous allez entendre. Quant aux conférenciers eux-mêmes, il serait tout aussi vain de ma part de vouloir vous les présenter. M. Chaumat, qui a été mon professeur à l'Ecole supérieure d'Electricité il y a déjà près d'un tiers de siècle et mon initiateur dans l'art difficile et minutieux des mesures électriques, a été aussi ce professeur et cet initiateur pour un grand nombre d'entre vous, et toutes les manifestations destinées à mettre en valeur la qualité du haut enseignement français ont toujours trouvé en lui le plus ardent et le plus convaincu des animateurs. Quant à M. Bethenod que vos suffrages ont désigné comme président

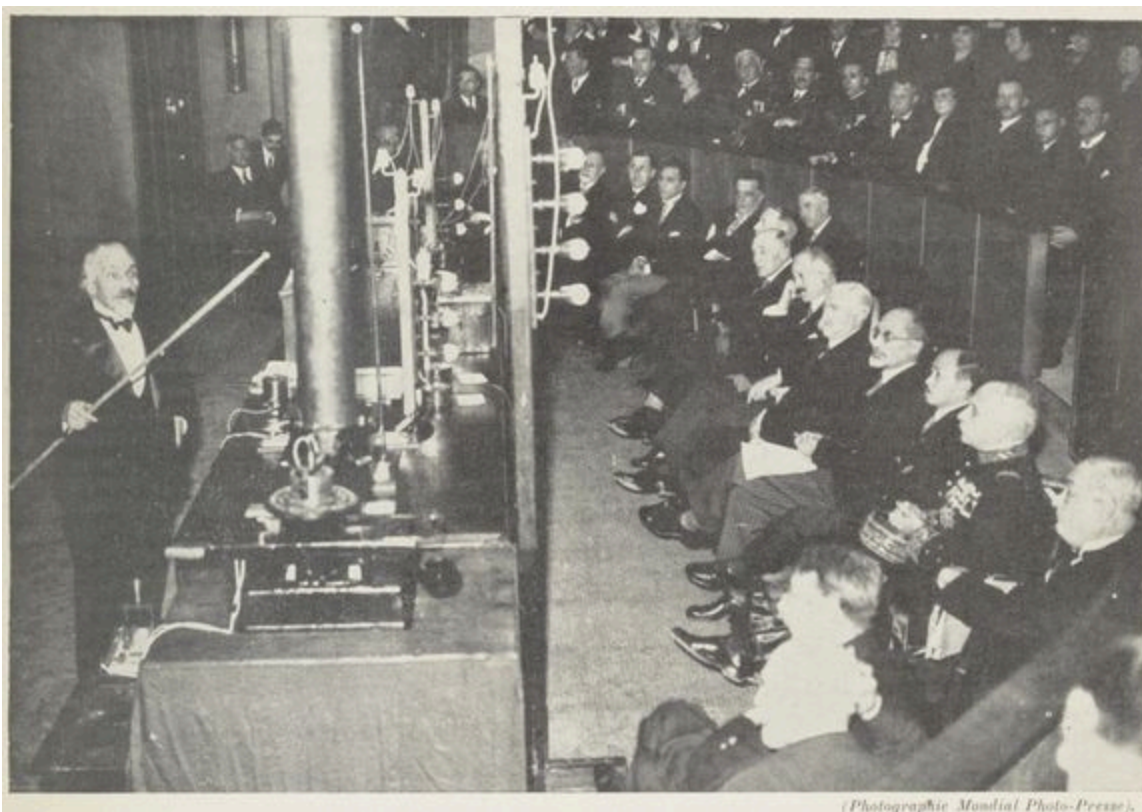
de notre Société pour l'année 1936, comme ils avaient désigné M. Chaumat voici cinq ans, il est connu des électriciens du monde entier pour la qualité de son génie inventif et la fécondité d'un esprit de recherche qui a exploré les domaines les plus variés de l'électrotechnique.

Aussi étaient-ils tous deux particulièrement qualifiés pour venir vous parler des deux précurseurs, que nous voulons honorer aujourd'hui. Ce mot même de précurseur semble, à première vue, justifier une réputation bien établie de l'esprit français, qui est de jeter son plus vif éclat à l'aurore d'une science ou d'une technique, dans la période de découverte ou de défrichement. Il est incontestable en effet que notre génie national, essentiellement individualiste, s'accommode mieux des tâches, où la qualité essentielle est de savoir se libérer assez des disciplines trop rigides, pour ne garder d'elles que le fil conducteur indispensable à toute recherche véritablement scientifique ; par contre, la période d'application et de perfectionnement, où prévaut souvent cette forme de génie qu'on a appelé une longue patience, est aussi celle où le succès doit récompenser surtout le travail en commun d'équipes, se succédant suivant un ordre établi, dans l'édification d'une œuvre conçue avec logique et exécutée avec discipline.

Toutefois, il serait tout à fait injuste d'accuser l'industrie française de n'avoir point su tirer le meilleur parti des recherches de Deprez et de Gaulard, dans le domaine qui était celui de leur but principal, c'est-à-dire le transport et la distribution de l'énergie électrique. Sans doute d'autres pays sont arrivés dans ce domaine à des réalisations plus grandioses ou plus spectaculaires ; nous ne pouvons nous enorgueillir de posséder les usines les plus puissantes, les barrages les plus gigantesques, les lignes de transport les plus longues et les plus chargées ; mais c'est que l'heureuse répartition des ressources naturelles dont bénéficie notre pays, qu'il s'agisse de ses torrents, de ses fleuves et de ses mines propres, ou des combustibles

étrangers que nos ports et nos canaux viennent mettre à la disposition de nos industries dans des conditions d'économie parfois imbattables, n'a point nécessité chez nous un tel effort ; ceux d'entre vous d'ailleurs qui assisteront au banquet de ce soir, où sera projeté le beau film sur les installations de la Truyère, y verront le témoignage d'une réussite dont peut s'enorgueillir à juste titre l'industrie française.

Vue prise durant la séance solennelle au Conservatoire national des Arts et Métiers pendant la conférence de M. H. Chaumat présentant une des premières expériences de Marcel Deprez.



(Photographie Mondiale Photo-Press).

Il est, par contre, un domaine où notre pays peut se targuer d'occuper une place particulièrement prééminente parmi les grandes nations, c'est celui de la diffusion de l'énergie électrique, de sa mise à la disposition d'une clientèle toujours plus nombreuse, et vous admettez tous, Messieurs, que c'est là, du point de vue social tout au

moins, le plus grand bienfait que l'on pouvait attendre du résultat des travaux dont nous célébrons aujourd'hui le cinquantenaire. Si nous consultons en effet les statistiques de l'Union internationale des Producteurs et Distributeurs d'Energie électrique, nous constatons que la France se classe au quatrième rang de la liste des pays d'Europe, derrière la Suisse, le Danemark et la Belgique, et, par conséquent, au premier rang des grands pays, en ce qui concerne le pourcentage de la population desservie électriquement, par rapport à la population totale, et au second rang derrière la Suisse seule, en ce qui concerne le pourcentage des habitations électrifiées ; les chiffres concernant la France sont de 97,6 pour 100 pour le pourcentage de population desservie, et de 93,6 pour 100 pour le pourcentage d'habitations électrifiées.

Ces résultats, obtenus il est vrai avec une certaine aide des deniers publics dans le cas des populations rurales très clairsemées, sont néanmoins tout à l'honneur de l'industrie française de la production et de la distribution, envers qui pourtant les critiques n'ont point manqué depuis quelques années. Ces critiques, à vrai dire, portent à peu près exclusivement sur le prix jugé excessif du kilowatt-heure rendu à domicile, bien que ce prix soit, parmi les éléments du coût de la vie, l'un de ceux qui ont le plus baissé en valeur or. Il est d'ailleurs remarquable que, depuis le début de la période de crise, la partie de la consommation d'énergie électrique qui dépend du bon vouloir de l'utilisateur, sur laquelle l'esprit d'économie peut donc s'exercer dans une certaine mesure, c'est-à-dire l'éclairage et les usages domestiques, non seulement n'a pas subi de fléchissement, mais a continué à marquer une progression indéniable, tandis que les usages industriels, où l'importance de la consommation d'électricité est conditionnée à peu près automatiquement par la quantité de produits fabriqués, ont suivi naturellement la marche descendante de l'indice de la production. Je ne crois pas d'ailleurs qu'on puisse citer

beaucoup de cas où une baisse du prix de l'énergie électrique, même au delà des limites tolérables pour le producteur, eût permis à une industrie défaillante de connaître un regain de prospérité.

Mais ce n'est point ici le lieu de recueillir les échos des polémiques récentes sur les prix de l'électricité, et je n'en retiendrai qu'une chose, c'est que, pour un élément devenu aussi indispensable à notre vie quotidienne et à l'activité de nos industries, c'est déjà un éloge de n'avoir plus à lui reprocher que sa prétendue cherté. Le temps n'est pas si lointain où le moindre client de nos réseaux avait toujours à portée de la main une lampe à pétrole ou un paquet de bougies et hier encore aucun industriel, aucun exploitant agricole, n'aurait accepté de demander à l'électricité la force motrice qui lui était nécessaire sans tenir tout prêt à fonctionner le moteur de secours jugé indispensable.

C'est que l'énergie électrique, à toutes les qualités qui ont provoqué son extraordinaire développement, joint un grave défaut, que jusqu'à présent on doit considérer comme constitutionnel, c'est son incapacité à se prêter à aucune espèce d'accumulation sous une forme économiquement réalisable.

Comme l'a très bien montré notre collègue, M. Fallou, dans la belle conférence qu'il faisait il y a quelques jours devant la Société des Ingénieurs civils de France et la Société française des Electriciens réunies ¹, la quantité d'électricité produite doit être à chaque instant rigoureusement égale à la somme des demandes des consommateurs augmentées des pertes, quelque variables et imprévisibles que puissent être ces demandes. Une telle égalité ne peut être obtenue et maintenue sur un grand réseau, malgré les incidents de toute sorte, dus aux intempéries, aux avaries de matériel ou aux fausses manœuvres, incidents qui viennent ajouter leur cause d'irrégularité aux variations brusques de la consommation,

que moyennant une organisation très complexe, dont les agents travaillent toujours un peu comme l'équilibriste sur la corde raide ; aussi n'est-ce pas un mince mérite pour notre industrie que d'être arrivée, à force d'études, de perfectionnements tant dans le matériel que dans les méthodes d'exploitation, de collaboration entre secteurs voisins, à force aussi, il faut bien le dire, d'immobilisation de capitaux nouveaux, à ce qu'une panne du une simple baisse de tension même de quelques secondes soit considérée maintenant dans la plupart des réseaux comme un phénomène exceptionnel. L'économie de la lampe à pétrole ou du moteur de secours équivaut bien pour l'utilisateur à une baisse de tarif qui n'est point négligeable et dont il ne tient pas toujours assez compte.

Est-ce à dire que le travail de nos ingénieurs doit maintenant se borner, dans l'exploitation, à ce rôle obscur et un peu ingrat d'équilibriste, ou, dans la construction, à la recherche harassante de la diminution des prix de revient en présence d'une concurrence toujours plus âpre, que le temps des précurseurs qui, comme Deprez ou Gaulard, partent à la remorque d'une idée neuve et trouvent des champs vierges à défricher, est définitivement aboli ? Bien loin de là, car jamais tant de sujets nouveaux ne se sont offerts à la curiosité de nos chercheurs : même en matière de production et de transmission d'électricité où il semblait qu'on fût parvenu à une certaine stabilité, au moins qualitative, n'avons-nous pas vu tout récemment des inventions basées sur un principe tout différent de celui des machines habituelles, telles que celle des soupapes ioniques à grilles commandées, ouvrir des horizons nouveaux et laisser voir des possibilités nouvelles ? Quant au champ des applications de l'électricité, il est théoriquement infini et nous le voyons pratiquement s'enrichir chaque jour d'une idée ou d'une réalisation, elles-mêmes génératrices d'autres idées et d'autres réalisations. Que ce soit dans le domaine de la mécanique,

de la lumière, de la chaleur, de la biologie, de la télécommunication, nous pouvons être assurés que des multitudes d'inventions nouvelles ne cesseront point de faire naître dans le public des multitudes égales de besoins nouveaux, et qu'après un bref instant d'admiration, qui va d'ailleurs en s'émuissant chaque fois plus vite, la satisfaction de ce besoin, inconnu de nos ancêtres ou de nous-mêmes quelques années auparavant, nous paraîtra si naturelle qu'elle ne deviendra plus qu'un motif de réclamations supplémentaires si nous n'en sommes point pourvus en tout temps et en tout lieu avec toute la prodigalité imaginable.

Mais bien loin de s'en plaindre. les électriciens ne doivent-ils pas considérer que ces exigences sont au fond le plus bel éloge que l'on puisse faire, à la fois de la fécondité de leur domaine et du zèle ingénieux avec lequel ils savent le cultiver et en répandre les fruits à la portée de tous ?

Mais je ne veux pas retarder plus longtemps l'accomplissement de l'objet principal de cette cérémonie, et je termine cette courte allocution en vous donnant l'assurance, M. le Président, que notre industrie sera toujours fidèle au mot d'ordre qu'elle s'est donné, et qui est de servir le public en honorant la science, comme elle le fait aujourd'hui en la personne de Deprez et celle de Gaulard.

Dans la conférence qui suivit ce discours, M. H. CHAUMAT, professeur au Conservatoire national des Arts et Métiers, ancien président de la Société française des Electriciens, montra Le rôle de Marcel Deprez dans l'asservissement des énergies naturelles par l'électricité ; tel était le titre de cette conférence à laquelle M. Chaumat, associant habilement l'anecdote instructive et les considérations techniques, donna l'allure d'un entretien du conférencier avec l'auditeur ; ayant connu Marcel Deprez, ayant approfondi son œuvre, il se proposa de faire suivre à

ceux qui l'écoutaient la voie qu'il avait lui-même suivie dans son étude du rôle de Marcel Deprez « dans l'asservissement des énergies naturelles ». Cette forme originale de sa conférence, à laquelle M. Chaumat a su imprimer un caractère particulièrement vivant en évoquant une histoire qu'il avait en quelque sorte vécue lui-même, ne se prête guère à un compte, rendu fidèle et nullement à une reproduction intégrale ; nous ne pouvons donc qu'indiquer ici, en en résumant l'exposé, les enseignements qu'a dégagés M. Chaumat de l'œuvre et de la vie de Marcel Deprez.

Marcel Deprez était ancien élève de l'Ecole supérieure des Mines ; remarqué par Combes, directeur de cette Ecole, il se voua d'abord à la mécanique : fait important qui explique ses préoccupations lorsque, plus tard, il consacra son activité aux applications de l'électricité. Son premier travail dans ce nouveau domaine est résumé dans la note qu'il présenta à l'Académie des Sciences le 15 mars 1880, sur le rendement économique des moteurs. Dans cette note, Marcel Deprez établit l'expression du rendement « économique » sous la forme du rapport de la force contre-électromotrice du moteur qu'il appelait « force électromotrice inverse » à la force électromotrice de la génératrice. M. Chaumat expliqua les raisonnements de Marcel Deprez et insista sur le fait que ce dernier ne fait intervenir dans sa définition du rendement économique que ce qui se passe dans le circuit, « ce qui est dans le fil », selon l'expression de M. Chaumat ; il ne s'agit donc pas du rendement tel que nous le comprenons aujourd'hui, mais du rendement « possible », celui qui est défini dans le principe de Carnot.

Ayant rappelé que Marcel Deprez avait fait sa première expérience publique de transmission d'énergie au Conservatoire national des Arts et Métiers, dans sa conférence du 15 juin 1882, M. Chaumat reprit cette expérience et il eut « la coquetterie », comme Marcel

Deprez l'avait eue lui-même, de faire passer une puissance d'un demi cheval dans un petit fil de cuivre de 0,1 mm de diamètre qui avait 30 m de longueur et représentait une ligne télégraphique de 80 km de longueur. Pour montrer l'influence des tensions élevées, M. Chaumat fit deux expériences : dans la première, la tension au départ est 110 v et l'on constate, en comparant la brillance des lampes placées au départ et à l'arrivée, que la chute de tension est fort sensible ; la différence des brillances est à peine apparente dans la deuxième expérience où la tension au départ est portée à 330 v. M. Chaumat reprit également l'expérience du marteau-pilon électrique que Marcel Deprez avait présentée le 15 juin 1882 et qui lui avait permis de montrer que si le nombre d'ampères tours reste constant, les forces en jeu ne varient pas.

C'est lors de l'expérience de transmission d'énergie entre Vizille et Grenoble, en 1883, que M. Chaumat fit la connaissance de Marcel Deprez. Ici, M. Chaumat conta un entretien qu'il eut avec lui, sans importance en soi-même, mais qui révèle un trait caractéristique de Marcel Deprez : sans perdre de vue, au contraire, les questions de détail qui se posent dans toutes les réalisations, Marcel Deprez s'efforce de dégager des phénomènes les principes qui doivent guider celui qui se propose d'exploiter ces phénomènes et d'asservir la matière ; il a la notion très précise de l'ordre de grandeur. Comment se traduisit, pour M. Chaumat, cette impression ? S'adressant à ce jeune étudiant, âgé de dix-sept ans, et lui parlant déjà relation intervenant dans l'application du frein de Prony, Marcel Deprez lui dit : « Cette formule est « presque » aussi exacte que la loi de Mariotte ». On conçoit qu'un esprit tout fraîchement conquis par la science, confiant en la rigueur de ses lois puisse être troublé par ce « presque » qui peut n'être qu'une forme timide de la négation... Et tant d'autres faits, relatés par M. Chaumat, empruntés à la vie de Marcel Deprez et qui le montrent à l'œuvre dans ses études et

dans la réalisation de ses expériences, lesquelles devaient aboutir aux expériences de Creil à Paris solennellement commémorées en cette journée du 30 novembre 1935.

En terminant, M. Chaumat présenta un portrait de Marcel Deprez, dû au peintre Cormon et formula le vœu que ce tableau restât la propriété du Conservatoire national des Arts et Métiers et figurât dans l'amphithéâtre où avaient été réalisées les premières expériences publiques de Marcel Deprez. M. Chaumat émit également le vœu que cet amphithéâtre devînt l'amphithéâtre « Aristide Bergès-Marcel Deprez (Hautes chutes-Hautes tensions) ».

Après cet hommage rendu à la mémoire de Marcel Deprez, la parole fut donnée à M. J. BETHENOD qui rendit compte de l'œuvre et de la vie de Lucien Gaulard, réalisateur du premier transformateur à courant alternatif. Le texte de cette conférence est reproduit plus loin.

Enfin M. Louis MARIN, ministre d'Etat, résuma en ces termes les enseignements qui se dégagent des aperçus, exposés en cette cérémonie, des travaux de Marcel Deprez, d'une part, et de Lucien Gaulard, de l'autre.

Monsieur le Président de la République,

Les organisateurs de cette réunion m'ont demandé de vous remercier très vivement en leur nom d'avoir bien voulu honorer de votre présence cette cérémonie. Elle ne marque pas seulement le cinquantième anniversaire de découvertes qui rappellent des noms chers à la science ; elle est, pour eux, en quelque sorte, et elle doit être, pour tous, une fête de la reconnaissance.

Les derniers mots de M. Bethenod à propos de la vie de Lucien Gaulard montrent combien de grands bienfaiteurs

de l'humanité, dans quelque domaine que ce soit, sont parfois oubliés des hommes après avoir souffert une vie singulièrement tragique.

Quand on se demande ce qu'auront vu les hommes de notre âge — et je rappellerai à M. le Président de la République que je ne suis non seulement son compatriote, mais son contemporain — on reste confondu par un si grand nombre de découvertes et de découvertes considérables, comme celle du transport de la force ! Et, puisque je parle de transport, je mesure l'écoulement du temps sur une plus modeste échelle quand je songe qu'en notre prime jeunesse nous avons usé du bicycle ; que nos parents nous ont ensuite acheté des tricycles ; que nous avons vu, vers nos vingt ans, apparaître les bicyclettes qui, quelques années après, avaient fait la conquête du monde !

Au temps de notre jeunesse, aucun de nous ne pouvait se douter de ce que serait l'aviation ou la radiophonie, par exemple, et je me rappelle les premières voitures automobiles circulant dans les rues de Paris.

M. Chaumat disait : « Il est quelquefois nécessaire d'oublier ce qu'on a appris jadis ». — Lui avouerai-je que les hommes de mon âge, quand ils étudiaient en quatrième ou, même, en philosophie, leur programme de physique, celui-ci ne comportait que quelques pages banales et brèves sur l'électricité et le magnétisme ?

En songeant aux bouleversements auxquels ont assisté les hommes de notre génération, je me rappelle, à l'Université de Nancy, ce jeune professeur qui comparait la transformation du monde et, particulièrement, du monde occidental, au lendemain de la Renaissance et au lendemain de la Révolution française.

Quand je me rappelle les précisions qu'il nous donnait sur les renouveaux mémorables de cette époque et à tout ce que nous avons vu, je me dis que l'humanité, alors que chaque génération apportait ses progrès et que certaines les accumulaient pour que nous en soyions heureusement

les bénéficiaires, je me dis que l'humanité a connu, de nos jours, des bouleversements sans précédent.

Il est, je crois, une double conclusion que vous me permettrez, M. le Président de la République, de tirer des enseignements de cette belle cérémonie.

La première est qu'une découverte, si importante qu'elle doive être pour le monde, n'en bouleverse pas moins quantité d'habitudes, gêne quantité d'intérêts et, par conséquent, provoque des réactions contre les inventeurs, alors qu'ils sont les bienfaiteurs de l'humanité. Indépendamment de ces hostilités, l'indolence de l'homme, sa négligence, font qu'on est obligé d'adapter les mœurs et les sociétés elles-mêmes à ces nouvelles découvertes avant que l'on en mesure le haut prix et qu'elles apparaissent génératrices d'un profit matériel et moral universel.

La deuxième leçon que je voudrais proposer à votre attention : c'est que la rapidité de certains progrès matériels a provoqué les difficultés devant lesquelles nous nous trouvons dans l'organisation économique du monde et aussi, dans le domaine social, car si le monde matériel change prodigieusement, le monde social change, lui aussi, et doit s'adapter sans cesse,

Quelque chose, en revanche, ne change jamais : la conscience humaine, les vertus de l'effort, celles du travail appliqué aux recherches désintéressées, les qualités d'équipe, comme le disait M. Milon tout à l'heure, tous les dons desquels les inventeurs ont donné le modèle aux hommes et prouvé l'efficacité.

Dominant tous les actes des peuples, leurs labeurs, leurs sacrifices, leurs triomphes ou leurs peines, il y a aussi parallèlement aux vertus des hommes, des principes qui ne changent jamais : le sentiment du devoir et de l'honneur, la loyauté intellectuelle, la fidélité à la parole donnée ; citons particulièrement, aujourd'hui, la reconnaissance, ce sentiment profond et fervent de gratitude que tous les hommes — et nous dirons, aussi, tous les peuples — doivent

à ceux qui ont rendu leur vie plus facile et qui ont accru la dignité de l'être humain.

C'est pourquoi vous me permettez, M. le Président de la République, qui, officiellement, représentez la France, de vous redire combien les organisateurs de cette réunion sont fiers que vous ayiez, ici, cet après-midi, applaudi les rappels de la vie des inventeurs dont on a vanté tout à l'heure les incomparables découvertes.

Ils vous remercient de ce haut témoignage d'une sollicitude dont les milieux scientifiques ont eu déjà de nombreuses marques et qui, pour les inventeurs futurs, doit être un précieux stimulant, comme symbole de la reconnaissance, envers eux, de la France entière.

Banquet à la Salle Hoche. — Un banquet, organisé à la Salle Hoche, réunissait les invités et les membres de la Société française des Electriciens en la soirée du 30 novembre 1935. A la fin du dîner, M. H. MILON, président de la Société française des Electriciens, prononça le discours suivant.

Un hasard chronologique a voulu que, quarante neuf ans après les expériences les plus marquantes de Marcel Deprez sur le transport de l'énergie à distance, vos suffrages, ou plutôt les suffrages de ceux d'entre vous qui sont membres de la Société française des Electriciens, m'aient désigné comme votre président pour l'année 1935. Bien qu'il n'y ait évidemment aucune espèce de relation ni de proportion entre ces deux événements, pour ne pas dire ces deux genres d'expérience, cette conjonction toute fortuite m'a valu l'honneur de prendre deux fois la parole aujourd'hui, une première fois pour remercier M. le Président de la République d'avoir honoré de sa présence notre cérémonie au Conservatoire national des Arts et Métiers cet après-midi, une seconde fois pour vous

remercier tous d'avoir répondu si nombreux à notre appel, ce soir.

C'est heureusement pour moi une tâche beaucoup plus légère et plus aisée que celle dont avaient bien voulu se charger nos deux collègues, MM. Chaumat et Bethenod, dont) vous avez entendu cet après-midi les conférences si documentées et si pleines d'aperçus inédits sur l'histoire des débuts de l'industrie du transport de l'électricité en France ; aussi ai-je tenu à les inscrire en tête de ma liste de remerciements ; ils ont été à la peine cet après-midi, il est juste qu'ils soient à l'honneur ce soir.

Je dois ensuite remercier les hautes personnalités qui ont bien voulu honorer ce banquet de leur présence : M. Pierre Appell, député, ancien sous-secrétaire d'État, à qui une glorieuse carrière d'officier de sous-marin a procuré jadis des contacts fréquents, parfois même un peu trop intimes, avec l'électricité ; M. Gaston Gourdeau, député, ancien sous-secrétaire d'État, qui nous avait assuré de sa présence et dont la place est restée vide à mon côté, a été retenu par une indisposition au dernier moment ; (vous savez combien en sa qualité d'ancien élève de l'Ecole supérieure d'Electricité, il s'intéresse à nos travaux et combien il est fidèle à nos réunions) ;

MM. les représentants des diverses sociétés savantes étrangères : M. G.-J.-T. Bakker, représentant le Koninklyk Instituut van Ingénieurs et le Comité électrotechnique néerlandais ; M. E. Bitterli, représentant l'Association suisse des Electriciens, l'Union des Centrales suisses d'Electricité et le Comité électrotechnique suisse : M. J. Grorselin, représentant l'Institution of electrical Engineers ; M. Matthis, représentant la Société belge des Electriciens ; M. Nicolini, représentant l'Associazione elettrotecnica italiana et le Comité électrotechnique italien ; M. Proca, représentant l'Institut national roumain pour l'Etude de l'Aménagement et de l'Utilisation des Sources d'Energie ; M. Sarrazat, représentant l'Institut

électrotechnique Montefiore ; enfin, le Comité électrotechnique espagnol, qui a bien voulu accepter de se faire représenter.

Je dois également remercier MM. les membres de l'Institut, parmi lesquels notre vénéré maître, M. Paul Janet, dont le nom est inséparable de l'histoire même du développement de l'électrotechnique française, M. Léon Guillet, M. Liesse, M. Maurain, M. le général Redon, ainsi que les représentants des divers Ministères et de diverses sociétés savantes françaises.

Nous avons la bonne fortune de compter parmi nous ce soir plusieurs représentants de la famille et des collaborateurs de Marcel Deprez, qui ont bien voulu s'associer ainsi à l'hommage que nous rendons à la mémoire de leur parent et de leur ami.

Le « Journal des Débats » a bien voulu se faire représenter par un de ses collaborateurs, M. Philippe Roland, et « La Journée industrielle », par M. de Castelnau.

La presse technique a bien voulu aussi nous déléguer ses représentants habituels, qui sont pour nous des amis et des collaborateurs de chaque jour.

J'ai reçu une quantité de lettres et de télégrammes d'excuses ou de félicitations exprimant tous le plus vif intérêt pour notre manifestation.

Je veux enfin remercier tout particulièrement les nombreuses dames qui ont accepté de se joindre à nous ; ce n'est jamais bien attrayant de célébrer un cinquantenaire, surtout pour ceux d'entre nous qui voudraient bien en être encore à la célébration du leur ; aussi devons-nous vous être très reconnaissants. Mesdames, d'être venues égayer de votre présence et de vos sourires une réunion qui, sans vous n'aurait présenté que des charmes un peu austères.

Je ne dois pas oublier non plus que cette cérémonie clôture la Semaine annuelle de Discussions de notre Société, semaine au cours de laquelle un grand nombre de

ses membres ont pu agiter entre eux les problèmes qui les intéressent, échanger les fruits de leur expérience personnelle, ou s'émerveiller des progrès accomplis récemment dans les branches de l'électricité qui leur sont moins familières.

C'est devenu, en effet, une impérieuse nécessité pour chacun d'entre nous, même s'il désire simplement s'acquitter convenablement de sa tâche quotidienne, que de s'efforcer de se tenir plus ou moins au courant des progrès accomplis chaque jour dans les sciences ou les industries voisines, progrès où nous devons trouver des exemples ou des inspirations.

S'il est indispensable, pour l'étude poussée d'une question, de se spécialiser, il est non moins indispensable, pour jouer un rôle actif dans cette spécialité même, pour la faire progresser tant soit peu, de garder un certain contact avec les spécialités voisines, comme avec les récentes acquisitions de la science. Cet effort, souvent très méritoire, surtout pour ceux d'entre nous qui ne sont plus tout jeunes, porte d'ailleurs en lui-même sa récompense, car je ne sais rien de plus passionnant que de suivre ainsi, de son fauteuil pourrait-on dire, le labeur de ceux qui s'efforcent, non pas d'arracher à la matière son secret, car ce serait une vaine tentative, mais de découvrir une harmonie nouvelle dans l'immense complexité de ses lois.

Les sceptiques, ou ceux que dépriment momentanément les duretés de la lutte quotidienne, diront sans doute que toutes ces belles découvertes ne nous ont pas rendus plus heureux. C'est là une vieille antienne, qui est même devenue un sujet classique de composition française. Rassurez-vous, je ne veux pas vous apporter ici mon petit devoir ; mais enfin il faut bien convenir que ni la science, ni l'industrie, ne peuvent avoir pour but, ni pour prétention, d'apporter à l'homme le bonheur. Celui-ci ne peut être qu'une construction personnelle ; que chacun de nous doit

édifier pour soi-même en se servant des éléments qui se trouvent à la portée de sa main.

Or, la science et l'industrie nous offrent précisément un nombre chaque jour croissant de ces éléments, sous la forme de satisfactions et de jouissances tant intellectuelles que matérielles ; l'arbre de la science est devenu un immense verger, plein de fruits de toute espèce, qu'aucune loi divine ne nous interdit plus de cueillir, bien au contraire.

Pourquoi donc cette abondance ne nous donne-t-elle pas mieux la sensation du bonheur ? Hélas ! il faut bien se l'avouer, ce qui nous gâche le plus souvent notre plaisir, c'est qu'au moment où nous goûtons un fruit, nous voyons notre voisin en cueillir un plus gros et un plus savoureux ; or, plus il y a de fruits à cueillir, plus naturellement les occasions de telles comparaisons deviennent fréquentes.

C'est au fond l'éternel contraste entre la production et la répartition. Les problèmes de la production intéressent surtout le savant, l'ingénieur, l'industriel ; les solutions qu'ils y apportent sont, non pas définitives, mais valables jusqu'à ce qu'une solution meilleure soit trouvée ; chaque progrès réalisé sert d'assise stable à des progrès futurs. La distribution des richesses au contraire, qui intéresse l'homme d'Etat, le juriste, le commerçant, met en branle les passions humaines qui n'ont guère changé au cours des siècles ; aussi tout progrès y est-il incertain, instable, et toujours susceptible d'être remis en question. Quoi d'étonnant à ce que la notion même de progrès, indiscutable pour celui qui regarde les choses avec l'optique du producteur, ne soit plus un article de foi pour celui qui les regarde du point de vue du distributeur ?

Je supplie mes collègues de ne voir ici aucune allusion perfide à un prétendu antagonisme entre producteurs et distributeurs d'électricité, d'abord parce que cet antagonisme n'existe pas, et ensuite parce que les distributeurs d'énergie électrique ont sur les distributeurs de richesses une supériorité incontestable, c'est qu'ils ont,

eux, réalisé des progrès patents et que personne ne pourrait mettre en question.

Nous vivons malheureusement à une époque où les difficultés de la répartition des richesses paraissent plus aiguës que jamais, où les engrenages des machines à distribuer paraissent grincer sérieusement. Mais pour reprendre notre image de tout à l'heure, s'il y a quelques bagarres lors de la distribution des fruits, est-ce une raison pour en rendre responsable le jardinier ? D'autant que ce jardinier, quand sonne pour lui l'heure de la distribution, quand vient le moment de goûter à ses fruits, n'est souvent pas mieux partagé que les autres, bien au contraire. Il lui reste, il est vrai, la ressource, qui n'est pas mince, de suivre le conseil de Candide et de cultiver son jardin, c'est-à-dire d'aimer son métier ; ce sera pour lui une source de satisfactions qui risque moins que d'autres d'être souillée par les éclaboussures de l'agitation extérieure.

Aussi est-ce là le conseil que je me permets de vous donner, mes chers collègues, en vous invitant à lever votre verre en l'honneur des progrès de la Science, et à boire à la prospérité de notre chère Société.

La parole fut ensuite donnée à M. E. BITTERLI, délégué de l'Association suisse des Electriciens, de l'Union des Centrales suisses d'Electricité et du Comité électrotechnique suisse, qui parla au nom de tous les délégués des sociétés étrangères en s'exprimant ainsi.

L'Association suisse des Electriciens, l'Union des Centrales suisses d'Electricité et le Comité électrotechnique suisse m'ont chargé de vous remercier de l'honneur que vous leur avez fait en les invitant à participer à la célébration du cinquantenaire des expériences de Marcel Deprez et des travaux de Lucien Gaulard. C'est avec émotion que je m'acquitte de cette mission, car elle me rappelle le jour où, en 1884, le professeur Galileo

Ferraris m'a conduit à l'Exposition internationale de Turin. C'est là, devant les « générateurs secondaires » que Galileo Ferraris, enthousiasmé par la géniale réalisation de Gaulard, m'a fait part dans un raccourci saisissant de ses vues sur la signification de cette réalisation pour le transport et la distribution de l'énergie électrique. Souvenir émouvant, associant les deux noms de Lucien Gaulard et de Galileo Ferraris !

L'activité créatrice des grandes maisons de construction de matériel électrique fut, à partir de cette époque, à la base du développement de l'électricité industrielle et il est incontestable que l'impulsion donnée par les travaux de Marcel Deprez et de Lucien Gaulard a, particulièrement hors de France, stimulé maint chercheur.

Aussi de nombreux groupements scientifiques et industriels étrangers ont répondu avec empressement à votre appel pour commémorer avec vous le souvenir de ces deux grands Français. Leurs délégués ici présents me chargent de vous remercier chaleureusement de votre invitation.

Je ne veux pas vous fatiguer avec l'énumération de ceux au nom desquels je parle ; votre président les a d'ailleurs déjà nommés dans les paroles de bienvenue qu'il nous a adressées. Toutefois, je ferai une exception pour nos amis d'Italie qui voudraient vous dire qu'ils conservent pieusement le souvenir du passage de Lucien Gaulard à Turin. Ils rappellent avec reconnaissance que l'origine des travaux de leur génial Galileo Ferraris aboutissant à la découverte du champ tournant se trouve dans les études et essais que Galileo Ferraris a pu faire à l'Exposition de Turin sur les « générateurs secondaires Gaulard ». Ils sont fiers que le premier transport d'énergie électrique à courant alternatif ait été réalisé chez eux entre Turin et Lanzo, couvrant une distance d'environ 30 kilomètres, à une tension de 2000 volts et 100 périodes par seconde.

Au nom de tous les groupements étrangers présents ici ce soir, je vous renouvelle nos sentiments d'admiration pour les grands hommes d'action, Marcel Deprez et Lucien Gaulard, dont vous commémorez le cinquantenaire de leurs travaux.

En quittant tout à l'heure nos amis, les électriciens français, nous emporterons avec nous la pensée réconfortante d'avoir assisté à une belle manifestation consacrée au souvenir de conquêtes de l'esprit, conquêtes qui ne connaissent que des vainqueurs et pas de vaincus.

A son tour, M. Pierre CAILLAUX, président du Syndicat professionnel des Producteurs et Distributeurs d'Energie électrique, prononça l'allocution suivante.

Au nom du Syndicat professionnel des Producteurs et Distributeurs d'Energie électrique, j'ai le devoir essentiel de remercier la grande Société française des Electriciens et son éminent président, mon ami et collègue, M. Milon, d'avoir eu l'initiative heureuse d'organiser cette belle manifestation destinée à célébrer les travaux accomplis il y a cinquante ans par Marcel Deprez et Lucien Gaulard.

En effet, l'industrie de la production et de la distribution de l'énergie électrique ne saurait oublier, et n'oublie pas, que c'est aux géniales découvertes de ces deux grands savants qu'elle doit le magnifique développement que vous connaissez et dont elle s'enorgueillit à juste titre. Vous accuseriez avec raison cette industrie d'ingratitude si elle ne venait pas, ce soir, joindre son pieux et modeste hommage à celui que vous rendez d'une façon si brillante à la mémoire de vos deux illustres devanciers.

Aussi bien, Messieurs, les bienfaits dont l'humanité est redevable à la science n'existeraient-ils pas si, dans le silence du cabinet ou dans le calme du laboratoire, des

savants laborieux et désintéressés n'avaient pas, à force d'efforts, réalisé des découvertes fécondes.

En 1881, à l'époque où Marcel Deprez commençait ses expériences, l'industrie électrique cheminait lentement sur la voie du progrès. Elle restait limitée à un petit nombre de cas particuliers. C'est alors que Marcel Deprez démontra que l'énergie électrique pouvait, sans pertes excessives, être transportée à des distances importantes. C'est grâce à ses efforts persévérants et à ses expériences qui connurent, vous le savez — c'est la dernière rançon du génie — des contradictions, que fut réalisé, en 1885, le célèbre transport de force de Creil à Paris.

Dans le même temps, Lucien Gaulard réalisait pratiquement le transformateur, lequel allait permettre le transport de l'énergie électrique non plus en courant continu — mais en courant alternatif.

Les conceptions de ces deux illustres savants techniciens, Marcel Deprez et Lucien Gaulard, ont dominé toute l'évolution de l'industrie électrique durant le demi-siècle qui vient de s'écouler. Les progrès que ces deux savants ont fait réaliser à l'industrie électrique se mesurent aux résultats aujourd'hui acquis. Au lieu d'une ligne à 6290 v transportant une puissance de 75 kw à une distance de 50 km, il existe, à l'heure où je vous parle, une ligne de 220000 v transportant des puissances de plus de 100 000 kw à des distances supérieures à 500 km. A quelques kilomètres de cette salle, non loin de la porte d'Italie, arrive au poste de Chevilly une ligne à 220 000 v, amenant à Paris l'énergie électrique du Massif central.

Ainsi, Messieurs, la lumière éclatante qui éclaire ce soir vos somptueuses agapes provient, en partie, du courant produit tout là-bas, au pied des chutes des montagnes d'Auvergne ou de celles du Velay.

Grâce aux découvertes de Marcel Deprez et de Lucien Gaulard, les bienfaits de l'électricité sont actuellement

répandus jusque dans les villages les plus reculés de nos campagnes.

En 1934, sur 38 000 communes existant en France, à peine 3 000 ne possédaient pas un réseau de distribution publique d'électricité. Ainsi, la presque totalité de la population française peut actuellement bénéficier des innombrables avantages du courant électrique.

Or, ce magnifique résultat, dont je ne puis vous tracer qu'une esquisse bien imparfaite, n'existerait pas sans les découvertes des deux savants techniciens que vous célébrez ce soir, tant il est vrai, Messieurs, que, dans ce monde, seule l'idée est créatrice et bienfaisante.

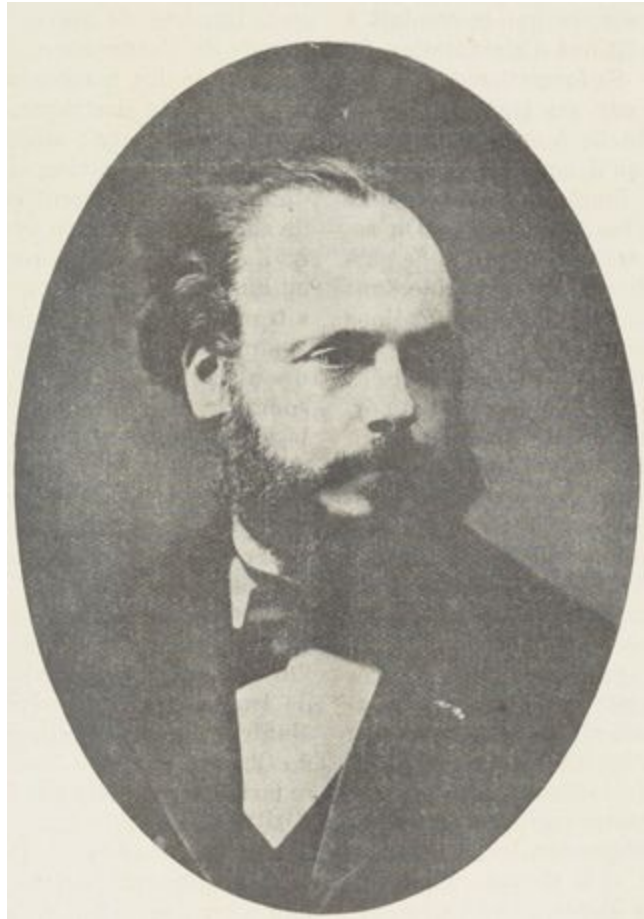
Honneur donc, Messieurs, honneur et gloire à Marcel Deprez et à Lucien Gaulard ! Honneur aussi à la Société française des Electriciens dont l'hommage rendu ce soir transmettra à la postérité la mémoire de nos deux savants !

M. Milon invita ensuite les personnes présentes à se rendre dans une salle voisine où fut présenté le film, dit « Terre soumise », des divers stades des travaux d'exécution de l'usine de Brommat de la Société des Forces motrices de la Truyère.

Marcel DEPREZ et les origines de l'électrotechnique

Il y a exactement cinquante ans commençaient les expériences de transmission d'énergie de Creil à Paris, suivant un programme établi par les ingénieurs de la Compagnie du Chemin de fer du Nord et accepté par Marcel Deprez, ingénieur du Syndicat français d'Electricité, conformément à un traité passé dès 1883 entre MM. de Rothschild frères et consorts et le Syndicat français d'Electricité. Les expériences, organisées entièrement par Marcel Deprez, devaient se poursuivre jusque dans le courant de l'année 1886 et faire l'objet de rapports officiels établissant la possibilité de transmettre des puissances de l'ordre de 50 à 100 ch à des distances de 50 km ; elles étaient basées sur les théories proposées par Marcel Deprez sur le « transport de force », théories que des essais antérieurs lui avaient déjà permis de vérifier et de mettre au point, mais avec des moyens plus limités, c'est à dire puissance moindre ou plus faible distance, qui avaient néanmoins permis de conclure à la possibilité de réalisations plus importantes.

Marcel DEPREZ
(1843-1918).



Les expériences de Creil à Paris, qui couronnent l'œuvre de Marcel Deprez, sont en même temps, dans l'histoire de l'électrotechnique, une date importante : elles marquent la transition de la période des tâtonnements, qui caractérisent les origines de toutes les techniques, à celle des réalisations conscientes, c'est à-dire basées sur une théorie, qui elle-même emprunte une partie au moins de ses éléments à l'expérience. Or, Marcel Deprez a contribué à l'élaboration de cette théorie de l'électrotechnique : il a vécu la période des tâtonnements et il a voulu arracher à l'empirisme cette technique naissante ; Marcel Deprez était en effet un mécanicien, comme nous le montrerons plus loin, qui avait eu le privilège dans sa jeunesse de pouvoir s'initier aux principes de la mécanique rationnelle et qui,

dès la fin de ses études, a pu faire l'expérience personnelle (la seule qui ait une réelle valeur dans la formation de l'esprit) de la valeur de ces principes dans l'interprétation des phénomènes observés et dans leurs applications. Il lui appartenait donc d'intervenir dans les discussions que soulevait l'examen des problèmes du « transport de force » et d'apporter, dans ces discussions, les résultats de ses expériences et de ses recherches qui devaient aboutir, comme nous venons de le dire, aux expériences de Creil à Paris. Avant de rendre compte de ces résultats, nous nous proposons, d'une part, de faire connaître les travaux de Marcel Deprez qui précédèrent ses recherches dans le domaine de l'électrotechnique et, d'autre part, de montrer ce qu'était alors ce domaine nouveau qui devait être si abondamment et si fructueusement exploité dans la suite, pour prendre l'importance qu'il a acquise aujourd'hui dans la vie sociale et économique.

I. Biographie de Marcel Deprez et résumé de ses travaux.
— Né à Aillant-sur-Milleron (Loiret), le 29 décembre 1843, Marcel Deprez fut élève externe à l'Ecole supérieure des Mines, à Paris, en 1865 : élève peu brillant, ainsi que le relata plus tard Joseph Bertrand dans l'article qu'il lui consacra, en 1883, et qui est reproduit plus loin, il fut néanmoins remarqué par le directeur de l'Ecole, Charles Combes, qui le prit comme secrétaire. Il occupa cette fonction de 1866 à 1872 ; dès le début, il s'intéressa vivement à l'étude des mécanismes ; déjà en 1867, il présentait une note à l'Académie des Sciences sur les appareils de distribution à un seul tiroir. Créateur de nombreux instruments de mesure et enregistreurs (indicateur de vitesse, indicateur dynamométrique, etc.), il attira l'attention de Joseph Bertrand par ses travaux relatifs aux modifications à apporter à l'indicateur de Watt ; il travailla également avec le lieutenant-colonel Sebert, et étudia avec lui les pressions développées dans les bouches

à feu. Il se fit aussi connaître par le wagon dynamomètre de la Compagnie des Chemins de fer de l'Est dont l'équipement fut entièrement conçu par lui et réalisé conformément à ses indications.

Ce grand mécanicien ne pouvait pas ne pas s'intéresser aux applications naissantes de l'électricité, notamment à ses applications mécaniques ; il se rend rapidement compte du parti que l'on peut tirer des aimants et des électroaimants. En 1874, il imagine des chronographes à électroaimants, ce qui le conduit à étudier et à comparer les conditions d'aimantation du fer, de la fonte et de l'acier. Sa formation technique et scientifique, perfectionnée par ses travaux dans le domaine de la mécanique, l'incite à approfondir tous les détails des mécanismes qu'il conçoit, à en comprendre le rôle exact et le fonctionnement en vue d'améliorer les conditions de leur utilisation. On retrouve ce souci d'éviter tout organe inutile et de parfaire tous les éléments des systèmes qu'il imagine dans toutes ses créations. Abordant l'étude des applications de l'électricité, Marcel Deprez tient à connaître les grandeurs mises en jeu dans les phénomènes utilisés ; il imagine, en 1878, son galvanomètre auquel il apportera des perfectionnements successifs et des modifications pour aboutir, en 1881, au galvanomètre mis au point avec M. d'Arsonval, prototype de l'appareil tel qu'il est encore employé aujourd'hui sous le nom de Deprez-d'Arsonval, dans la forme définitive que lui donnèrent les auteurs en 1882. Créateur du galvanomètre, devenu classique, Marcel Deprez a également énoncé le principe du logomètre, en 1884. Toujours dans ce même domaine des applications des « forces électriques », Marcel Deprez, dès 1881, tire parti de la propriété des courants de Foucault dans un disque en mouvement entre les deux pôles d'un aimant : on sait que dans un tel mouvement, le couple est proportionnel à la vitesse ; Marcel Deprez applique cette propriété à son indicateur magnétique de vitesse. En 1883, il reprendra

cette disposition et la proposera pour la substituer, dans le « mesureur d'énergie » de Siemens, aux ailettes prévues dans le modèle primitif ; à cette occasion, Marcel Deprez établira la théorie exacte du compteur attribué à E. Thomson et montrera que dans un instrument de mesure d'énergie le couple résistant doit être proportionnel à la vitesse, condition satisfaite par le couple dû aux courants de Foucault, mais non par celui opposé par l'air au mouvement des ailettes.

Il conçut, dès 1880, l'application d'un moteur électrique au transport des dépêches sur tout le réseau souterrain de Paris. Plus tard, il établira avec Maurice Leblanc un projet de chemin de fer électrique pour Paris. Il envisage également l'utilisation de véritables petits moteurs synchrones en créant un dispositif destiné à assurer le synchronisme de deux mouvements relatifs et, comme judicieuse application de ce procédé, il imagine la boussole électrique.

En 1881 ont lieu, à Paris, l'Exposition internationale d'Electricité et le Congrès international des Electriciens, deux manifestations dont la coïncidence était voulue et qui devaient devenir historiques, car elles devaient donner une impulsion intense à l'électrotechnique naissante et, de ce fait, une orientation nouvelle aux travaux des premiers pionniers de cette nouvelle branche de l'activité humaine, parmi lesquels Marcel Deprez. On entrevoit alors dans l'électricité un moyen remarquablement puissant d'asservir les énergies naturelles... et ceci, dans des conditions qu'il importe de préciser. Marcel Deprez apporte à l'étude de l'organisme, ou du système, que constitue l'ensemble des machines destinées les unes à engendrer l'énergie électrique, les autres à la transformer à leur tour en énergie mécanique, et des circuits reliant entre elles génératrice et réceptrices toute la minutie du mécanicien qui veut comprendre le fonctionnement de chaque élément du système et ne rien confier de ce qu'il a à concevoir, à

réaliser, à contrôler, à diriger, au hasard et à l'empirisme ; il établit la théorie du « transport de force », considérant séparément chacun des organes et procédant à une analyse méthodique des phénomènes mis en jeu dont la combinaison doit conduire au rendement optimum. Cette théorie, il la base sur des résultats expérimentaux et la vérifie par de nouvelles expériences ; il ne lui suffit pas de reprendre les expériences effectuées par d'autres ; il veut, à son tour, réaliser ce qu'il conçoit, pour contrôler ses principes et aussi pour justifier ses points de vue aux yeux de ses nombreux détracteurs ; d'où les quatre expériences publiques qui ont revêtu un caractère officiel et sont devenues classiques dans l'histoire de l'électrotechnique ; ce sont les expériences de transmission d'énergie électrique de Miesbach à Munich, en 1882 ; celles des ateliers de la Compagnie du Chemin de fer du Nord à la Chapelle, avec une ligne se fermant en boucle par Le Bourget, en 1883 ; celles de Vizille à Grenoble dans cette même année et enfin les expériences de Creil à Paris, en 1885.

« Premier réalisateur du transport de force à haute tension, 5 800 v, à Creil », Marcel Deprez est élu membre de la section de mécanique de l'Académie des Sciences dans la séance du 1^{er} mars 1886, à la suite du décès de Tresca ; il obtint 36 suffrages sur 52 votants. En 1890 fut créée la chaire d'électricité industrielle au Conservatoire national des Arts et Métiers, et Marcel Deprez en fut nommé titulaire par le ministre du Commerce et de l'Industrie, après avoir été désigné à son choix à l'unanimité des suffrages par ses collègues de l'Institut et par les professeurs du Conservatoire. La première leçon eut lieu le 15 décembre 1890. Marcel Deprez fut également suppléant de Joseph Bertrand à la chaire de physique mathématique du Collège de France jusqu'en 1900.

Marcel Deprez mourut le 14 octobre 1918 à Vincennes (Seine) et un dernier hommage public fut rendu à sa mémoire le 7 décembre 1918, dans la « Revue générale de l'Electricité », par Maurice Leblanc qui avait fait sa connaissance en 1880. « Marcel Deprez, écrit Maurice Leblanc, a été le père de cette magnifique industrie du transport électrique de l'énergie et ne serait-ce qu'à ce titre, tout le monde doit respectueusement saluer sa mémoire ».

II. L'électrotechnique en 1881. — L'année 1881 est, nous l'avons dit, une date importante dans l'histoire de l'électrotechnique ; elle en marque l'origine, comme l'année 1885 marque l'origine de sa conséquence immédiate, celle de l'industrie de la production et de la distribution de l'énergie électrique, les expériences de Creil à Paris ayant en effet montré les possibilités de cette nouvelle forme de l'énergie dans le cas du courant continu, tandis qu'en même temps les pionniers du courant alternatif, Lucien Gaulard, avec son transformateur, et Galileo Ferraris, qui établissait le principe de son application à la force motrice, faisaient la preuve de l'intérêt de cette deuxième solution.

Afin de comprendre le rôle des précurseurs d'une science ou d'une technique il importe de se rendre compte des matériaux dont ils disposent pour jeter les bases de l'édifice que leurs successeurs n'auront plus qu'à continuer et à parfaire.

Qu'était l'électrotechnique antérieurement à 1881 et quel est l'événement sensationnel de 1881, qui donna un essor si puissant à cette branche naissante des applications de l'électricité pour que, quatre ans après, elle pût proclamer son triomphe et prévoir le plus brillant avenir ?

La période antérieure à 1881 est celle des recherches empiriques. Les lois fondamentales de l'électricité étaient connues : Ampère, en 1821, et Faraday, en 1831, avaient

découvert les phénomènes essentiels et jeté les bases de ce qui devait devenir plus tard l'électrotechnique. Mais ce courant électrique dont on connaissait les effets était peu intense ; les potentiels mis en jeu étaient faibles ; les générateurs étaient constitués par des piles ; et le souci des premiers réalisateurs d'appareils où fussent utilisées les lois de l'induction électromagnétique était de mettre au point une machine fournissant un courant de même nature que celui des piles, d'où les difficultés résultant de l'incompatibilité entre la théorie qui impose une variation du flux et le résultat à obtenir qui doit être un courant continu. Enfin, Pacinotti, Gramme, et d'autres après eux, triomphent trente ou quarante ans après la découverte de Faraday.

Dans le domaine des applications mécaniques de l'électricité, conçues comme possibles dès 1821, date de naissance de l'électromagnétisme, la période de tâtonnements se prolongea également jusque vers 1880 et elle se traduit, comme toutes les époques qui marquent l'origine d'une nouvelle technique, par la grande diversité de types de moteurs électriques qui furent imaginés : les uns, ceux de la « première phase », selon une expression de Th. du Moncel, utilisaient l'attraction des aimants ou des électroaimants, donnant lieu à un mouvement de translation de l'organe mobile et les efforts des inventeurs portaient sur la recherche de mécanismes permettant de transformer ce mouvement de translation en un mouvement de rotation ; dans les types de la « deuxième phase », était appliquée la propriété de la génératrice à courant continu d'être réversible, sans que toutefois cette réversibilité eût été encore érigée en principe, au moins dans le domaine des applications. Y a-t-il lieu d'être surpris que ce principe, qui était connu et qui est devenu fondamental dans l'électrotechnique moderne, ne se soit pas imposé aux premiers techniciens qui ont mis au point tant de types de génératrices et tant de modèles de

réceptrices sans établir spontanément et d'une façon péremptoire l'analogie que doivent présenter ces machines ? Faut-il s'étonner des difficultés que rencontrèrent les pionniers de l'électrotechnique pour introduire la notion de la similitude, qui nous est si familière aujourd'hui, de la force électromotrice de la génératrice et de la force contre-électromotrice de la réceptrice Certes, non ; et ceci, pour la raison suivante. Les ingénieurs qui s'intéressaient aux applications de l'électricité à la mécanique étaient des mécaniciens ; ils parlaient de force et de travail, là où l'électricien aujourd'hui, qui a hérité des résultats acquis par ses prédécesseurs, introduit les notions de force contre-électromotrice et d'énergie. Il a fallu l'intervention d'hommes de génie, comme Maxwell, pour résumer les phénomènes découverts par Ampère, d'une part, et par Faraday, d'autre part, en une formule exprimant leur réversibilité et qui se traduit pour nous par la relation $d\Phi = id \Phi$; mais en 1880, son œuvre était encore peu connue et loin d'avoir acquis droit de cité dans un enseignement classique ; les connaissances de l'époque ne pouvaient être empruntées qu'à la mécanique et ce sont ces notions qui devaient servir de base à l'interprétation des phénomènes si mystérieux observés dans l'électromagnétisme. Il importe de bien se rendre compte de la formation et du bagage scientifique et technique des ingénieurs d'alors pour que ressorte la valeur de leurs travaux dans ce nouveau domaine encore inexploré.

Certes Pacinotti, en décrivant en 1864 son moteur, montre que « cette machine « électromagnétique » est réciproque de la machine « magnétoélectrique » puisque dans la première le courant électrique qui y a été introduit par les « rhéophores », en circulant dans les bobines, permet d'obtenir le mouvement de la « roue » et son travail mécanique, tandis que dans la seconde, on emploie un travail mécanique pour faire tourner la « roue » et obtenir,

par l'effet de l'aimant permanent, un courant qui circule dans les bobines pour se transporter aux « rhéophores » et de là être amené dans le corps sur lequel il doit agir » (cette traduction est due à Th. du Moncel et date de 1883) ; mais il s'agit d'un cas particulier, le principe est encore énoncé trop timidement pour que les mécaniciens d'alors en tirent spontanément tout le parti possible et abandonnent tout de suite des recherches relatives à des types de moteurs ne rentrant pas dans la catégorie des machines réversibles. Plus tard, Hippolyte Fontaine et Gramme, dans leurs expériences à l'Exposition de Vienne, en 1873, surent appliquer ce principe : les deux machines, l'une génératrice, l'autre réceptrice, étaient identiques. Plus tard encore, Marcel Deprez, perfectionnant un type de moteur, démontra que la machine modifiée par lui était réversible. En résumé, donc, sans avoir été interprété théoriquement avant 1880 avec le caractère général que nous lui connaissons aujourd'hui, au moins en ce qui concerne son application à l'étude des machines, le principe de la réversibilité était connu, mais les mécaniciens d'alors, devenus électriciens, n'étaient pas exercés à l'utiliser d'une façon courante. Voici d'ailleurs un passage qui marque l'évolution des conceptions relatives aux phénomènes électriques ; il est emprunté aux « Leçons sur la théorie mathématique de l'électricité » professées par Joseph Bertrand, en 1890, dix ans après les premiers travaux de Marcel Deprez en électrotechnique ; ce passage, empreint encore des conceptions des mécaniciens s'occupant d'électricité, est le suivant : « Supposons une pile ou une machine produisant une force électromotrice E ; soient I l'intensité et R la résistance du circuit. Le travail dépensé pendant chaque seconde est EI , la chaleur engendrée est RI^2 . On a

$$El = RI^2.$$

» On emploie le courant à produire un travail, l'intensité diminue et devient I' . Soit e la force électromotrice inverse développée par ce travail, on aura

$$\frac{E - e}{R} = I'.$$

» L'intensité étant devenue I' , le travail dépensé est El' , au lieu de El . Le travail produit par un courant diminue, par un paradoxe singulier de la mécanique, le travail nécessaire pour l'entretenir. La chaleur communiquée au fil n'est plus, d'après la loi de Joule, que RI'^2 ». La phrase, soulignée ici, mais qui ne l'est pas dans le texte original, est particulièrement caractéristique, car elle montre quelles étaient les préoccupations des théoriciens de l'époque, et ce passage méritait d'autant plus d'être cité ici qu'il est très probablement inspiré des travaux de Marcel Deprez dont Joseph Bertrand reconnut toujours la valeur et l'importance.

En ce qui concerne la possibilité de la transmission de l'énergie électrique à une certaine distance, elle avait été expérimentée publiquement à l'Exposition de Vienne en 1873 par Hippolyte Fontaine et Gramme, avec deux machines Gramme, comme nous venons de le dire. En 1881, dans une lettre adressée au Congrès international des Electriciens et lue en séance publique le 4 octobre 1881, Hippolyte Fontaine revendiquait « l'honneur d'avoir fait la première expérience du premier transport des forces par l'électricité ».

A partir de cette époque, quelques expériences isolées furent tentées ; pour ne citer que celles connues en France,

mentionnons celles de la sucrerie de Sermaize (Marne) en 1879, où les ingénieurs Félix et Chrétien procédèrent à des essais publics de transmission d'énergie électrique utilisée pour le labourage. La traction électrique fit également l'objet de recherches intéressantes : à l'Exposition de Berlin en 1879, fonctionnait un chemin de fer électrique de démonstration mis au point par la maison Siemens et Halske, qui réalisa également à l'Exposition internationale d'Electricité de Paris, en 1881, le chemin de fer reliant la place de la Concorde au Palais de l'Industrie. Voilà quelques faits, quelques résultats, sans omettre les essais de distribution d'énergie électrique pour l'éclairage entrepris un peu partout dans les années qui précèdent l'année 1881.

Toutes ces expériences sont basées plus sur l'empirisme que sur la théorie, laquelle d'ailleurs ne pouvait intervenir qu'après les tâtonnements de cette technique naissante. Les lois fondamentales étaient connues ; elles étaient du domaine de la physique et il appartenait à des mécaniciens de les introduire dans les applications. Mais pour cela, il fallait des éléments et notamment des données numériques, indispensables à ceux qui se proposent d'asservir la matière avec l'aide de formules. Les nombres doivent correspondre à des grandeurs nettement définies, et résulter de mesures, ce qui suppose des unités et, par conséquent, une convention. Il fallait donc, d'une part, créer des instruments de mesure ou adapter à ces nouvelles applications ceux utilisés dans les laboratoires et, d'autre part, établir des conventions relatives à la définition des grandeurs employées et des unités destinées à les exprimer par des nombres. Tous ces problèmes se posaient au fur et à mesure que les réalisateurs faisaient faire des progrès aux applications de l'électricité et il ne pouvait appartenir à un seul homme de les résoudre tous. C'est alors qu'eut lieu le Congrès international des Electriciens, en 1881, dont les travaux aboutirent à

l'établissement du système d'unités de grandeurs électriques et magnétiques, qui constitue encore aujourd'hui le « code » des électriciens. A partir de cette époque, tous les électriciens, théoriciens et réalisateurs, physiciens et mécaniciens, au laboratoire et à l'atelier, parleront le même langage. Notons, à propos de ce Congrès, que Marcel Deprez y était inscrit comme membre et qu'il intervint dans les discussions des questions qui lui étaient familières : instruments de mesure, machines et « transport de force ». Mais Marcel Deprez n'était pas seulement membre du Congrès international des Electriciens, il contribuait au succès de l'Exposition internationale d'Electricité, qui avait lieu à la même époque, à Paris, et y présentait une installation de distribution d'énergie électrique pour la force motrice. Membre du Congrès et exposant, à la fois théoricien et réalisateur, voilà bien le véritable caractère du technicien qui doit savoir établir la liaison entre la science pure et la science appliquée ; et c'est peut-être à cette association, dans le même homme, de l'esprit spéculatif et de l'esprit pratique que sont dus les succès des travaux de Marcel Deprez et sa fructueuse contribution à l'évolution rapide de l'électrotechnique. Cette double participation de Marcel Deprez aux manifestations de 1881 montre que, tenté par le caractère mystérieux du nouveau procédé qui devait lui permettre de satisfaire son besoin de créer, il avait déjà donné à son activité, si féconde antérieurement dans le domaine de la mécanique, une orientation nouvelle.

Il avait entrevu les possibilités des applications de l'électricité, ignorant alors qu'il allait écrire une des plus belles pages de l'histoire de l'électricité, celle dont le cinquantenaire a été célébré le 30 novembre 1935.

III. Théorie du « transport de force ». — Il faut entendre, sous ce titre, la théorie de chacun des organes principaux, génératrice, ligne et réceptrice, qui rentrent dans

l'équipement d'une installation de transmission d'énergie électrique. D'après le rapport de Maurice Lévy, présenté à l'Académie des Sciences, sur Marcel Deprez, la première théorie du transport de force a été exposée par O. Frölich à l'Académie des Sciences de Berlin, le 18 novembre 1880, et Marcel Deprez a le premier expérimenté le transport de force à haute tension, à Creil.

Il convient néanmoins d'ajouter qu'avant d'entreprendre chacune des expériences publiques de « transport de force » qui devaient aboutir aux expériences de Creil, Marcel Deprez a tenu à établir lui-même la théorie des phénomènes observés et qu'il se proposait d'exploiter, ses expériences lui permettant de vérifier les conclusions de ses raisonnements et lui fournissant en même temps de nouveaux éléments pour parfaire ces conclusions. Bien entendu, les considérations développées par Marcel Deprez furent discutées et il rencontra des détracteurs dont les critiques présentent un réel intérêt historique puisqu'elles nous permettent de nous rendre compte des conceptions de l'époque. Si les expériences dont il a été question dans le paragraphe précédent avaient montré la possibilité de transmettre de l'énergie électrique à distance, cette application ne paraissait plus intéressante, au point de vue économique, si les puissances mises en jeu étaient élevées et la distance, très grande, à cause des fortes sections qu'il semblait falloir admettre pour les conducteurs ; c'est cette question de la section du cuivre que résout Marcel Deprez : son souci de la réduire au minimum se retrouve dans ses expériences toutes réalisées « avec un fil télégraphique ». A la question d'économie s'ajoute celle de rendement ; les conditions d'économie et la condition de rendement satisfaisant paraissaient incompatibles ; il fallait les concilier et c'est à cette fin que tendent les premières études de Marcel Deprez qui sera amené, dans cette étude, à étudier le fonctionnement des machines et à établir ainsi une théorie complète du « transport de force » sans perdre

de vue que le transport à distance de l'énergie électrique ne peut avoir un intérêt général que si cette énergie est susceptible d'être distribuée. Quelle est cette théorie ou, plus exactement, quels sont les points caractéristiques de cette théorie ? C'est ce que nous essayons de résumer ici.

1. INSTRUMENTS DE MESURE ET MÉTHODES D'ESSAIS. — Avant d'exposer des considérations purement théoriques, il importe de souligner ici, une fois encore, le souci qu'a Marcel Deprez, de connaître tous les appareils qu'il se propose d'utiliser et éventuellement de réaliser ceux qui étaient à créer. Il modifie son galvanomètre pour la mesure de courants intenses (nous dirions aujourd'hui « industriels ») et en fait l'ampèremètre, sans d'ailleurs le désigner sous ce nom à l'origine, mais sous celui de « rhéomètre à gros fil » ; il montre que le galvanomètre peut être utilisé pour la mesure des différences de potentiel, et devient un « rhéomètre à fil fin ». Il énonce le principe du wattmètre et, utilisant ses premiers travaux dans le domaine de la mécanique, il montre que la combinaison du wattmètre et de son « totalisateur » conduit au « mesureur d'énergie ». Tous ces résultats sont acquis en 1880 ; du moins le principe en est posé et dans la suite, les premières réalisations seront perfectionnées pour être mieux adaptées aux besoins de la pratique. Ce même souci se retrouve dans les dispositifs de mesure des grandeurs mécaniques, force, vitesse, travail, dispositifs qu'il avait eu l'occasion d'étudier et de mettre au point avant de devenir électricien. Notons, parmi ces dispositifs, celui auquel ultérieurement fut donné le nom de « dynamo-frein », créé par Marcel Deprez qui se rendit rapidement compte de l'intérêt qu'il avait à ramener à des mesures électriques celles des grandeurs mécaniques.

Le matériel destiné à arracher à l'expérience le secret des phénomènes à exploiter et à contrôler l'exactitude des raisonnements et des hypothèses qui sont à la base de leur

interprétation est donc en possession de Marcel Deprez qui s'inquiète de tous les détails de leur fonctionnement, en particulier de leur étalonnage. Est-ce à Marcel Deprez qu'est due la méthode d'opposition si fructueuse dans les mesures ? Nous n'osons le certifier ; mais il convient de remarquer qu'il la décrit à plusieurs reprises et sait en tirer parti. Il faut, pour qu'il puisse affirmer, que les instruments dont il interprète le langage donnent des indications exactes. Et à ce propos, nous pouvons supposer que Marcel Deprez se sera réjoui de l'ordre apporté, à la suite des travaux du Congrès international des Electriciens, dans le langage des électriciens.

2. ECONOMIE ET RENDEMENT — La question d'économie, au point de vue des frais d'établissement d'un « transport de force », est tout entière dans la question de la section des conducteurs. Marcel Deprez la résout en disant : « J'adopterai un fil télégraphique » et, partant de ce principe que la transmission de l'énergie électrique, quelles que soient la puissance et la distance, est possible, il cherche quel sera le rendement d'un tel système. Nous savons aujourd'hui, parce que la notion de force contre-électromotrice nous est familière, que le rendement que nous appelons « électrique » d'une installation comportant une génératrice, une ligne et un moteur est le rapport de la force contre-électromotrice du moteur à la force électromotrice de la génératrice ; mais les fondateurs de l'électrotechnique, qui étaient des mécaniciens, rapprochaient plus volontiers la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique de celle, beaucoup mieux connue, exprimée par la loi de Joule ; d'où l'assimilation, fréquente dans les raisonnements qu'ils nous ont laissés, de la force contre-électromotrice à une résistance parcourue par un courant et les comparaisons de deux régimes, celui du moteur en mouvement et celui du moteur au repos avec une résistance en série pour ramener le courant à la valeur

qu'il avait dans le régime précédent. D'une façon générale, la notion d'énergie, si commode pour établir la liaison entre les diverses catégories de phénomènes, sans être ignorée, n'avait pas encore acquis cette portée et ce caractère général que nous lui attribuons. Aussi ne faut-il pas être surpris de la complication du raisonnement par lequel Marcel Deprez a démontré le premier, dans sa note à l'Académie des Sciences du 15 mars 1880 ², que le rendement qu'il appelle économique est égal au rapport de la force électromotrice « négative » à la force électromotrice « positive ». Dans cette expression est éliminée la notion de puissance ; en ce qui concerne le rôle de la distance, Marcel Deprez montrera plus tard « que le rendement reste constant, quelle que soit la distance, pourvu que les forces électromotrices positive et négative varient proportionnellement à la racine carrée de la résistance du circuit ».

Sur la base de ces théorèmes, Marcel Deprez calcule le rendement que l'on obtiendrait avec deux machines identiques, distantes de 50 km et reliées entre elles par un fil de 4 mm de diamètre. Il prend comme point de départ les résultats d'expériences entreprises à l'Ecole du Génie militaire de Chatham (Angleterre), avec deux machines Gramme du type C, dont les inducteurs ont une résistance de 0,15 ohm ; l'induit, une résistance de 0,06 ohm. Il calcule le rendement que l'on pourrait obtenir avec des conducteurs, de l'induit et de l'inducteur, de section 50 fois plus petite que celle des conducteurs des machines essayées ; les enroulements inducteurs occupant le même volume auraient 50 fois plus de spires et, pour le même nombre d'ampères-tours, le courant serait 50 fois plus faible. Dans ces conditions, le rendement économique de la transmission serait de 65 pour 100 pour une puissance transmise de 10 ch, soit 750 kg-m : s ; 404 kg-m : s seraient perdus par effet Joule dans le circuit et la puissance

absorbée serait donc 1 154 kg-m : s. Ces nombres ne peuvent être obtenus que par une augmentation de la vitesse de la machine génératrice, par conséquent une augmentation correspondante de celle de la machine réceptrice.

Ce résultat étant acquis, savoir la définition du rendement par le rapport des forces électromotrices négative et positive, la transmission de l'énergie électrique, quelles que soient la puissance et la distance, apparaît comme possible dans des conditions satisfaisantes d'économie et de rendement. Il suffira de pouvoir atteindre les potentiels élevés qu'exigeront les grandes distances. Seule l'expérience permettra de vérifier cette possibilité et ce sont ces essais que va tenter Marcel Deprez sur la base de ce théorème. Empressons-nous d'ajouter que l'on connaissait la relation entre la force électromotrice d'une génératrice et celle d'un moteur, la tension aux bornes et les résistances intérieures de ces machines et que, de plus, Marcel Deprez se rendait parfaitement compte qu'il y avait une différence entre les puissances mécaniques absorbée par la génératrice et fournie par la réceptrice, mesurées au dynamomètre sur l'arbre des machines, et les puissances définies par leurs forces électromotrices et le courant ; il savait aussi que, dans une première approximation, les écarts entre ces résultats, correspondant aux pertes mécaniques et magnétiques dans les machines, ne modifiaient pas sensiblement les conclusions de sa théorie.

Ce théorème du rendement économique, Marcel Deprez ne tardera pas à le généraliser, c'est-à-dire à l'étendre à toutes les formes de l'énergie sous lesquelles peut être utilisée l'énergie électrique ; il montre, en particulier, l'analogie, au point de vue de leur interprétation, des applications mécaniques de l'électricité et de celles qui en sont faites en électrolyse.

Il ne suffit pas, en ce qui concerne l'économie, de porter son attention sur la ligne ; les machines sont également à

considérer. Ce point de vue n'échappe pas à Marcel Deprez qui introduit, dès 1882, la notion de « prix de l'effort statique », défini comme étant le rapport de la puissance perdue par effet Joule dans un moteur à l'effort électromagnétique dû au courant correspondant et appliqué au moteur au repos. Le prix de l'effort statique est une fonction des dimensions relatives de l'inducteur et de l'induit, considération qui servira de base au calcul des machines.

3. FONCTIONNEMENT DES GÉNÉRATRICES. — Dans ses investigations relatives aux machines utilisées pour la transmission et pour la distribution de l'énergie électrique, Marcel Deprez introduisit, en même temps que O. Frölich en Allemagne, une méthode d'étude de leur fonctionnement par construction graphique, la méthode devenue classique aujourd'hui. Non seulement Marcel Deprez eut l'idée de recourir à la Construction de la courbe qu'il appelle lui même caractéristique de la machine, mais il en tira d'utiles enseignements que nous allons résumer.

Les machines dont s'occupe Marcel Deprez sont des machines à excitation série. La courbe qu'il construit est la caractéristique représentant la variation de la force électromotrice E en fonction du courant I pour une vitesse donnée ; deux procédés sont indiqués pour le relevé de cette courbe : la machine fonctionne à circuit ouvert, le circuit inducteur étant alimenté par une source étrangère, ou la machine est à circuit fermé et la force électromotrice est calculée par le produit $E = RI$, R étant la résistance totale du circuit, y compris celle de la machine. Pour mettre en évidence l'influence de la vitesse, Marcel Deprez écrit

$$I = \frac{\omega E_1}{\omega_1 R}$$

en désignant par E_1 la force électromotrice de la machine à la vitesse ω_1 ; I étant le courant pour la vitesse ω et R étant défini ci-dessus. Puis, posant

$$\omega = k\omega_1,$$

il obtient

$$\frac{E_1}{I} = \frac{R}{k}.$$

Considérant la caractéristique à la vitesse ω_1 , il construit la droite passant par l'origine et dont le coefficient angulaire est $\frac{R}{k}$ et montre que cette construction permet de résoudre « tous les problèmes que l'on peut se poser sur les machines dynamoélectriques, mais elle a surtout l'avantage de jeter une vive lumière sur les phénomènes qu'elles présentent ».

Marcel Deprez supposant connue, par exemple, la caractéristique pour la vitesse ω_1 , se propose de déterminer la force électromotrice et le courant pour une vitesse w . Le point à considérer pour cette vitesse w est le point d'intersection de la caractéristique et de la droite de

coefficient angulaire $\frac{R}{k}$; son abscisse représente le courant et le produit de son ordonnée par k , la force électromotrice. D'une façon générale, pour que la machine produise le courant dont on a besoin il faut que si l'on fait varier R , la vitesse, ou k , varie dans le même sens. De plus, Marcel Deprez conclut de cette étude que la caractéristique d'une machine ne peut être une droite, car suivant la valeur de $\frac{R}{k}$ le courant serait soit nul, soit indéterminé ou infini, soit

infini ; ces deux derniers cas sont absurdes puisque l'expérience montre que le courant ne peut être que nul ou fini et déterminé.

Ici encore, sur la base de ces considérations théoriques, il relève les caractéristiques d'un certain nombre de machines et procède à une analyse minutieuse des modèles essayés et des résultats obtenus.

Ces résultats confirment les prévisions théoriques : le champ magnétique dû aux bobines inductrices ne dépend que du produit du nombre d'ampères par le nombre de spires, c'est-à-dire du nombre d'ampères tours, remarque que Marcel Deprez signala comme importante lorsqu'il s'agit de calculer les bobines et qui montre, en même temps, que les notions de champ, d'induction et de flux, sans être étrangères aux électriciens d'alors, ne leur étaient pas familières, comme elles le sont à ceux d'aujourd'hui ; un autre point qu'il a relevé est la nécessité d'adopter de fortes sections pour les pièces polaires et les noyaux polaires afin « d'éviter l'abaissement que la caractéristique éprouve toujours dans les types usuels de machines » lorsque le courant augmente. La cause de ce phénomène, Marcel Deprez l'expliqua, dès 1882, par la distorsion du flux inducteur sous l'influence du courant dans « l'anneau qui devient un aimant dont la ligne des pôles se confond avec le diamètre qui passe par les points de contact des balais et du collecteur ». Cette influence de la réaction d'induit, Marcel Deprez sut la mettre en évidence en relevant la caractéristique d'une machine dont l'induit est parcouru par un courant constant, seul le courant inducteur variant.

Il s'agit là de problèmes concernant la transmission à distance de l'énergie électrique ; mais cette opération ne présente un intérêt général que si cette énergie peut être distribuée ; autrement dit, le problème de l'utilisation « des énergies naturelles » n'est que partiellement résolu, si ceux que soulève la distribution de cette énergie électrique,

agent de transmission, sont laissés dans l'ombre. Or, il appartient encore à Marcel Deprez d'introduire dans la théorie du « transport de force » celle, qui lui est si intimement liée, de la distribution. Il conçut les deux modes de distribution à intensité de courant constante, tous les appareils d'utilisation étant en série, ou à tension constante, les appareils d'utilisation étant en dérivation. Ce dernier mode de distribution retient particulièrement son attention. Marcel Deprez cherche la solution qui permettra d'assurer automatiquement la constance de la tension : la solution, c'est encore lui qui la propose, c'est la machine à excitation composée ou « à double enroulement » ; à l'enroulement inducteur en série est ajouté un deuxième enroulement à excitation séparée, qui a pour effet de déplacer vers la gauche de l'axe des ordonnées l'origine de la caractéristique, d'où les constructions graphiques connues aujourd'hui et que Marcel Deprez exposa le premier.

En ce qui concerne la distribution à intensité de courant constante, si Marcel Deprez n'en envisagea pas l'application, il en exposa néanmoins la théorie ; la génératrice est encore à excitation composée, un enroulement étant alimenté par une source extérieure et créant le champ que Marcel Deprez appelle le « champ initial », le deuxième enroulement étant en dérivation aux bornes de la machine ; plus tard, Marcel Deprez proposera, pour ce mode de distribution, l'excitation composée, avec un enroulement à excitation séparée et un deuxième enroulement en série, mais l'action des deux enroulements étant différentielle. Dans ses conclusions relatives à la machine à excitation composée, Marcel Deprez ayant étudié les deux modes de distribution peut donc écrire : « La différence réside dans le mode d'accouplement des circuits inducteur et induit ; le même appareil pourrait donc fournir les deux résultats par le seul jeu d'un commutateur ».

4. CONCLUSION. — Ainsi sont donc posées avec Marcel Deprez et par Marcel Deprez les bases de l'électrotechnique des machines à courant continu, non seulement des génératrices, mais aussi des moteurs : il a tenu, en effet, à vérifier les propriétés des machines qui, étudiées comme génératrices, fonctionnent en moteur, à mettre en évidence le couple qu'elles peuvent développer, à se rendre compte de l'influence de l'enroulement inducteur à excitation séparée qu'il ajoute à l'enroulement série. Il applique à l'étude des moteurs la méthode graphique qui leur a donné de si heureux résultats dans l'étude des génératrices.

Considérant les relations entre la puissance que peut développer une machine et ses dimensions, il établit le théorème des similitudes qui lui permettra de modifier en toute connaissance de cause les dimensions des machines qui avaient fait leur preuve, qu'il avait expérimentées lui-même, pour créer des machines capables de développer des puissances plus importantes que celles envisagées jusqu'alors. Dans ce théorème est introduite la notion d'effort statique, qui intervient fréquemment dans les raisonnements de Marcel Deprez et qu'il utilisa dans le calcul et l'étude des machines ; il montra que « si l'on augmente toutes les dimensions d'un système conducteur de forme quelconque suivant un rapport déterminé K , sans changer le flux électrique qui parcourt l'unité de section, les résultantes de tous les efforts statiques élémentaires augmentent comme la quatrième puissance de K », et le corollaire suivant qui n'est pas moins suggestif : « lorsque toutes les dimensions d'un système conducteur sont augmentées dans le rapport K , un même effort F est produit avec une dépense d'énergie K fois plus faible ». On retrouve dans ce corollaire le souci d'une réalisation qui fût réellement intéressante.

En résumé, avant 1885, avant les expériences de transmission d'énergie électrique de Creil à Paris, dans un intervalle de quatre ou cinq ans, l'électrotechnique, qui n'existait pour ainsi dire que par les tâtonnements du début, avait fait un pas immense : les premières pages, et les plus importantes, du chapitre concernant le courant continu étaient écrites ; les principes étaient posés et il était permis à Marcel Deprez, lui-même, d'écrire, dès 1883, ce qui suit :

« L'enseignement de la physique au point de vue de l'électricité est resté tout à fait insuffisant non seulement dans les lycées, mais encore dans les écoles d'ingénieurs. On continue à considérer l'électricité au point de vue télégraphique, c'est-à-dire comme destinée seulement à faire œuvre de précision et à produire uniquement des effets excessivement faibles comme travail mécanique.

» Ceux qui ont pénétré plus loin dans l'étude de cet agent n'ignorent pas que son rôle est infiniment plus étendu ; l'Exposition internationale d'Electricité l'a prouvé du reste à ceux mêmes qui sont étrangers à la science. Il est résulté en particulier de ce remarquable ensemble d'appareils divers que l'électricité, contrairement au préjugé qui a longtemps régné et qui domine encore l'enseignement, est éminemment propre à la production et à la transmission lointaine de travaux mécaniques aussi considérables qu'on le voudra, application nouvelle dont l'étendue et les conséquences sont d'une importance qu'on ne saurait limiter ». Il est émotionnant de lire cet enthousiasme que les résultats acquis en cette année 1935 justifient si pleinement.

Citons encore : « L'avenir appartient aux grandes forces électromotrices et aux grandes machines ».

IV. Expériences publiques et officielles effectuées par Marcel Deprez. — Elles furent au nombre de quatre : en 1882, entre Miesbach et Munich ; en 1883, aux ateliers de

la Compagnie du Chemin de fer du Nord ; également en 1883, entre Vizille et Grenoble et en 1885, entre Creil et Paris. Ces expériences ont chacune fait l'objet de comptes rendus et de rapports officiels, établis par des commissions autorisées. Ces rapports sont reproduits ou résumés plus loin. Nous nous bornerons ici à donner le texte de la dépêche qu'adressa spontanément à l'Académie des Sciences le comité institué à Munich pour suivre l'expérience entre Miesbach et Munich.

Munich, 2 octobre, 11 h 40 mn.

Nous sommes heureux de vous annoncer que l'expérience de M. Marcel Deprez, ayant pour but de transporter une force par fil télégraphique ordinaire, entre Miesbach et Munich (distance 57 km), a pleinement réussi.

Le secrétaire
V. MILLER.

Le Comité
pour les Essais électrotechniques.
Le premier président,
Dr V. BEETZ.

Enfin, en ce qui concerne les expériences entre Creil et Paris, qui couronnent l'œuvre de Marcel Deprez, citons simplement les termes de l'amiral Jurien de la Gravière, alors président de l'Académie des Sciences, dans la séance solennelle du 20 décembre 1885 :

Le 5 décembre, sur l'invitation de M. Marcel Deprez et de MM. de Rothschild, nous nous étions rendus à Creil. Ce jour-là nous vîmes deux fils de cuivre de 5 mm de diamètre

livrer passage à un courant électrique dont nous revînmes constater les effets à Paris : la force de plus de 40 chevaux-vapeur se trouvait transportée par l'électricité à 50 km de la machine génératrice.

En célébrant solennellement le cinquantième de ces expériences, méthodiquement étudiées et préparées par Marcel Deprez, la Société française des Electriciens a rendu un juste hommage à la mémoire de l'un des principaux fondateurs de l'électrotechnique.

Ad. CURCHOD.

Une page d'histoire

Marcel Deprez
d'après Joseph Bertrand

Joseph Bertrand, membre de l'Académie des Sciences, dont l'attention avait été attirée sur Marcel Deprez dès ses premiers travaux dans le domaine de la mécanique, lui consacra un article publié simultanément dans la « Revue des Deux Mondes » et dans « La Lumière électrique » ³. Cette voix autorisée décrit le caractère de Marcel Deprez, le montre au travail, le suit dans ses raisonnements, et salue le succès de ses travaux : cet hommage, datant de 1883, devait être joint à ceux rendus aujourd'hui à sa mémoire. Le texte de cet article est donc reproduit ci-dessous.

L'antithèse entre la théorie et la pratique plaît aux ignorants, elle encourage leurs efforts stériles ; beaucoup croient appliquer la science qui ne l'ont jamais étudiée. On peut, sans rien savoir, inventer une machine qui marche, être admis, sans objections, ni conseils importuns, à payer un brevet d'invention dont le numéro d'ordre seul pourrait servir d'avertissement. Il serait curieux de chercher et utile de dire, parmi les cent cinquante-six mille cinquante-quatre projets caressés d'abord avec tant d'espérances, combien

ont pu subir l'épreuve de l'expérience et y survivre ; combien, en moindre nombre, ont enrichi leurs inventeurs ; combien enfin, plus glorieux et plus rares, ont mérité pour eux une place dans l'histoire de la science. Dans cette très courte liste, que de tristesse encore. La justice des contemporains ne devance jamais le succès, l'indifférence attend, pour le voir, la sanction d'une longue pratique, et pour le retarder la malveillance fait plus que détourner les yeux. James Watt, il y a cent ans à peine, écrivait à son illustre ami le docteur Black : « De toutes les choses de cette vie, il n'y en a pas de plus folle que de faire des inventions ». On pourrait sans crainte graver ces tristes paroles au pied de la statue du grand inventeur : dans le rayonnement d'une telle gloire, elles ne décourageraient que les envieux.

I. — Quelque nom que l'on donne à cette folie, dont Watt, qui s'en plaignait, n'eût pas voulu guérir, nul n'en est aujourd'hui plus complètement atteint que M. Marcel Deprez ; nul n'est moins accessible au découragement, moins ébranlé par les déceptions, et, pour faire triompher ses idées, mieux résigné à tous les sacrifices. Il réunit, par un rare privilège, à une imagination pleine de ressources, un jugement droit et sévère. Quoiqu'il préfère le bon sens à l'étude, aucune partie de la science n'est pour lui d'une méditation trop profonde. Dans le cercle très étendu des théories qu'il discute et qu'il applique, il n'a jamais, à ma connaissance, été repris d'insuffisance ou d'erreur.

C'est à un ingénieur éminent, à un membre regretté de l'Académie des Sciences, Charles Combes, que la science doit sans doute M. Marcel Deprez. Combes était bienveillant et accessible à tous ; son expérience attirait les inventeurs ; et sa franchise, au risque de les froisser, leur épargnait plus d'une illusion. Un très jeune homme, un jour, lui demanda audience. Il était élève de l'Ecole des Mines ; Combes, comme directeur, avait ses notes sous les

yeux ; elles promettaient peu et, s'il faut tout dire, on y invitait l'élève Marcel Deprez à abandonner des études commencées sans ardeur et poursuivies sans régularité. Le jeune écolier alléguait une excuse : accoutumé à suivre ses idées, lorsque le commencement d'une leçon faisait apparaître un problème, il cessait d'écouter et voulait le résoudre. Forgeant son âme au lieu de la meubler, comme le conseillait Montaigne, il avait peu appris ; mais les principes, médités sans cesse, l'avaient conduit par des voies simples à des vues réellement nouvelles. Le maître respecté des maîtres qui le repoussaient l'écouta avec plaisir, avec profit même, il se plaisait plus tard à le dire. Combes s'informa de sa position ; il était pauvre ; de son ambition, elle se bornait à satisfaire librement, sans programme impérieux, les curiosités de son esprit. Cet auditeur inattentif des plus savantes leçons sentait le charme de la science ; ce disciple rebelle aux exercices de l'école aimait le travail et l'étude ; cet écolier sans émulation avait le feu sacré et le génie de l'invention. Combes en avait le respect et le zèle ; il prit M. Marcel Deprez près de lui, et, tout en rémunérant ses utiles services, le dirigea sans le gêner en rien. Bientôt même, renversant les rôles, il rédigeait, pour les présenter à l'Académie des Sciences, avant de les insérer dans un de ses ouvrages, les premiers travaux de son secrétaire.

M. Marcel Deprez simplifiait en le perfectionnant le mécanisme des tiroirs dans une machine à vapeur. Le mouvement du piston est alternatif : on doit, pour l'entretenir, agir sur les deux faces successivement, sans que les pressions opposées puissent à chaque instant, entrer en lutte. A la fin de chaque course, la vapeur dilatée et refroidie s'échappe dans l'atmosphère ou dans le condenseur, pendant que celle de la chaudière entre du côté opposé. Une plaque, qu'on nomme tiroir, va, vient et glisse sans cesse sur trois ouvertures qu'elle couvre et découvre pour fermer les communications et les ouvrir à

propos. Cette pièce est la plus délicate de la machine ; une seule seconde de retard, un seul millimètre d'avance pourrait troubler et renverser l'action. Les solutions de M. Deprez sont simples ; la description en serait longue. Quelques citations suffiront pour faire comprendre, sans en diminuer en rien le mérite, le généreux élan de l'excellent M. Combes.

Combes, dans ses études sur la machine à vapeur, consacre plus de vingt pages à la description du tracé de M. Deprez qui n'est pas moins simple — c'est la louange très flatteuse qu'il lui donne — que celui du professeur Zeuner. M. Haton de la Goupillière, dans une savante et judicieuse revue des progrès récents de l'exploitation des mines, décrit à son tour et juge avec autorité, après dix ans d'épreuves, la coulisse de M. Deprez. « Tandis qu'on ne craint pas, dit-il, de multiplier indéfiniment les articulations dans certains appareils récents, celui de M. Deprez ne comporte qu'un excentrique et une seule articulation. » Les ingénieurs du Chemin de fer du Nord ont constaté enfin, dans un rapport officiel sur une locomotive munie du nouveau mécanisme, et pour un trajet de 30000 km, une économie de 20 pour 100.

De tels jugements semblent sans appel. M. Marcel Deprez, — le cas est rare, — les a trouvés trop favorables. Les conditions imposées aux tiroirs soulèvent plus d'un problème. Il voulut les résoudre. Sans consulter les maîtres ni pâlir sur les livres, le jeune volontaire de la science entreprit l'étude de la détente, la discussion des principes qui condamnent les espaces libres et prononcent sur les inconvénients de l'admission anticipée de la vapeur. Le secrétaire de Combes avait des loisirs ; les ateliers devinrent son école. Spectateur attentif, puisant à la source, il recueillait des observations, prenait note des singularités, critiquant tout, jugeant tout, et tentant d'ingénieux essais. L'effort de la vapeur est variable, il faut, pour procéder avec ordre, le mesurer en chaque point de la

course. L'indicateur de Watt a cette destination et met le corps de pompe en communication avec un petit cylindre dans lequel un piston, pressé par la vapeur, comprime un ressort qui donne la mesure de la tension ; un crayon l'inscrit en traçant une courbe sur un papier mobile.

Cette solution rapide n'est qu'approchée. Pour s'ajuster à la force qui le pousse, un ressort a besoin d'un temps plus ou moins long suivant sa raideur ; l'indicateur n'en accorde aucun. Dans l'inscription continue d'une force qui varie sans cesse, un retard est inévitable et rien ne prouve qu'il soit constant. De rapides sinuosités dans la courbe tracée, surtout vers la fin de la course, trahissent, si j'ose le dire, l'incertitude et l'hésitation du crayon. Les constructeurs prescrivent, il est vrai, de remplacer par un trait régulier, dont on se contente, la ligne moyenne de ces indications parasites. Plus scrupuleux et plus défiant, M. Deprez voulut, sans corrections arbitraires, obtenir un tracé certain. Il proposa une méthode signalée par Combes à l'Académie des Sciences comme ingénieuse et nouvelle et réalisée bientôt avec succès par les ingénieurs du Chemin de fer du Nord.

Le petit instrument que M. Deprez voulait remplacer était bien connu de Combes, qui trente ans avant, au retour d'un voyage d'Angleterre, l'avait, un des premiers, décrit et préconisé en France. « Cet instrument simple et portatif, écrivait Combes en 1847, est fort connu en Angleterre. J'en ai publié la description et je l'ai appliqué à plusieurs machines en y apportant une modification qui le rend d'un usage plus commode et plus exact. »

M. Deprez, approuvé et loué par Combes, voulut être complètement exact. Les effets d'une force, proportionnels au carré du temps, sont, en un centième de seconde, dix mille fois moindres qu'en une seconde. Le dilemme est décourageant : si l'action dure peu, l'effet est imperceptible ; si elle se prolonge, le résultat n'est qu'une moyenne. M. Deprez, très ingénieusement, renverse le

problème, il se donne la force et prend pour inconnue la position correspondante du piston. Au moment où la tension de la vapeur atteint la valeur assignée d'avance, elle détermine le mouvement d'une pièce jusque-là maintenue par une force supérieure et fait marquer un point de la courbe à construire.

L'appareil fut construit. M. Deprez prit toutes les mesures dans les ateliers du Chemin de fer du Nord, sur la machine même munie de la coulisse inventée par lui. La conclusion fut inattendue. Les espaces libres, condamnés et proscrits, et l'admission anticipée de la vapeur, sont sans influence sur le rendement. L'assertion était paradoxale. Les conditions de la meilleure marche sont réduites en règles précises. M. Deprez, applaudi par ses maîtres, a rempli tout leur programme. La machine, munie de son système, procure une économie officiellement constatée, et l'inventeur lui-même, respectueux de la seule vérité, sans se soucier d'affaiblir un succès auquel un plus habile aurait demandé la fortune, explique avec précision les conditions dans lesquelles l'inconvénient corrigé ne rendrait pas la machine moins parfaite.

Le travail d'une machine doit être comparé à la dépense faite pour le produire. L'admission anticipée de la vapeur et la compression qui en résulte, lorsqu'il n'existe aucune autre imperfection, diminue, pour chaque coup de piston, le travail de la machine ; mais la dépense de vapeur, et avec elle, la consommation du charbon, sont réduites en même temps ; le rapport reste le même. Le perfectionnement est comparable à celui qui, dans un appareil d'éclairage, procurerait, en même temps qu'une plus grande consommation de gaz, une plus grande production de lumière.

Les ingénieurs cependant, après de longs essais, avaient proclamé une économie de 20 pour 100. D'où vient cela ? M. Deprez en donne la véritable cause. On demandait aux machines comparées la même quantité de travail. Celle qui

portait la coulisse nouvelle marchait dans les conditions normales. L'allure de l'autre était forcée. Les choses se passaient à peu près comme si, voulant comparer deux machines, l'une de 9, l'autre de 10 ch, on leur imposait à toutes deux un travail de 10 ch. Parce que la seconde ferait mieux cette tâche (qui est la sienne), on aurait tort de la déclarer mieux construite. Le contraire aurait lieu si, pour faire l'épreuve, on leur imposait un travail commun de 9 ch. Une machine construite pour produire 9 ch de travail, si on supprime, par un jeu habile des tiroirs, l'admission anticipée et la compression de la vapeur, peut devenir une machine de 10 ch ; sa qualité restera la même ; on brûlera par heure et par force de cheval, la même quantité de charbon. Le système, toujours avantageux, de M. Deprez se trouve ainsi réduit à sa plus juste valeur. L'observation est judicieuse et fine ; il y aurait eu, pour tout autre, un mérite à la faire le premier ; pour l'inventeur, le mérite est double.

M. Deprez avait trop vécu dans les ateliers pour ignorer qu'on y préfère à la précision la rapidité des résultats, et la simplicité à la rigueur. Le mouvement rectiligne de va-et-vient du crayon de l'indicateur fait naître sur un papier mobile une courbe nommée diagramme, dont la surface mesure le travail d'un coup de piston. M. Deprez s'est proposé de tracer cette courbe, ou, pour parler plus exactement, de la faire tracer par la machine, en laissant le papier immobile. Il a résolu ce problème : deux points mobiles ayant des mouvements quelconques, forcer un troisième point à décrire le mouvement résultant des deux autres. L'un des deux points mobiles, est-il besoin de le dire ? est l'extrémité du crayon, le second est animé du mouvement qu'on donnerait au papier et que l'on remplacera par celui d'un organe de la machine. La courbe obtenue, sans être changée en rien, sera amplifiée ou réduite, suivant les cas. Tout l'avantage consiste à débarrasser l'appareil du papier mobile, qui le rendait moins portatif et moins simple.

Je ne puis terminer cette rapide et incomplète revue des travaux de M. Deprez sur la machine à vapeur sans parler d'un régulateur de vitesse très ingénieux, très nouveau, reposant sur les plus judicieux et les plus savants principes, bien peu connu cependant, car, entraîné par d'autres recherches, M. Deprez ne l'a ni construit, ni décrit dans aucun recueil.

Le régulateur de Watt est bien connu. Deux boules liées à la machine se rapprochent ou s'écartent sous l'influence de la force centrifuge, suivant que la vitesse diminue ou augmente. Leur écartement agit sur une valve qui facilite l'admission de la vapeur quand la vitesse est trop petite, et la modère quand elle est trop grande. Tout écart de vitesse tend ainsi à se corriger. Mais l'effet est lent et souvent incomplet. Plusieurs mécaniciens, au premier rang desquels il faut citer Foucault, ont ingénieusement substitué au régulateur de Watt un système isochrone, contraint, par sa constitution même, de prendre une vitesse déterminée, ou, sinon, d'être poussé immédiatement à l'une des positions extrêmes : élevé au plus haut aussitôt que s'accroît la vitesse, il tombe au plus bas dès qu'elle se ralentit. Trop énergique et trop brutale, la correction dépasse le but, et ces continuels coups de caveçon font naître et entretiennent des oscillations qui ne cessent plus. La solution proposée par M. Deprez repose sur cette remarque : dans un grand nombre de cas, les résistances à vaincre dans une usine sont indépendantes de la vitesse. La force nécessaire pour entretenir une allure, quelle qu'elle soit, reste la même. On travaille moins en marchant plus lentement, on développe le même effort.

Ceci étant admis, M. Deprez associe à sa machine un régulateur de Watt ordinaire ; il le laisse, quand la marche est troublée, travailler à la rétablir ; mais au lieu d'abandonner les outils aux lentes oscillations qui vont naître, il attend le premier maximum de vitesse, pour fixer, dans la position qu'elles ont prise, les valves régulatrices

de la vapeur. Comme l'avait deviné Kepler et l'a formellement énoncé Fermât, au moment de tout maximum, la variation devient nulle. La vitesse étant un instant constante, les forces mouvantes font équilibre aux forces résistantes, et si les premières deviennent invariables, les secondes l'étant, par hypothèse, l'équilibre ne sera plus troublé. La vitesse restera constante, mais elle ne sera pas celle que l'on désire. Pour revenir à la vitesse normale et y rester, il suffira d'ouvrir ou de fermer, pendant un instant, une valve, distincte de celle que fait agir le régulateur, c'est là le point essentiel, en mettant fin à son action dès qu'on aura atteint la vitesse désirée, qui se maintient jusqu'à l'intervention d'une cause perturbatrice exigeant une manœuvre nouvelle.

II. — M. Marcel Deprez, dans une courte note adressée à l'Académie des Sciences, avait indiqué, sans s'étendre sur le détail, pour l'étude des gaz de la poudre, l'application du principe nouveau proposé pour la mesure des pressions variables. Le Corps de l'Artillerie de Marine entendit l'appel. Une commission présidée par le général Frébault fit construire, sur les dessins de M. Deprez, un appareil très délicat, dont l'étude formait tout son programme. Les ressources mises à sa disposition, les louanges éclairées de collaborateurs d'élite et la flatteuse confiance de la commission, stimulèrent le jeune inventeur. Abordant la question sous toutes ses faces, il proposa d'ingénieuses conceptions, et pour chaque problème des solutions variées, adoptées en principe, et mises sans retard à l'étude. Le savant colonel Sebert, chef d'escadron alors et rédacteur des travaux communs, dans les comptes rendus publiés à plusieurs reprises par le « Mémorial de l'Artillerie de Marine », signale expressément, avec une sincérité digne de ses talents, le rôle prépondérant de M. Marcel Deprez. Qu'on me permette ici une réflexion que je ne veux pas taire.

Le Corps de l'Artillerie de Marine, attentif aux progrès de la science, exécute, depuis plus de trente ans, les travaux techniques les plus admirés. De laborieux et savants officiers, dignes de leurs chefs, y associent leurs noms à ceux du colonel Sebert et des généraux Frébault et Virgile ; leurs annales, publiées pour l'armée seulement, sont lues dans toute l'Europe et consultées utilement par les représentants de la science pure.

Ce corps d'élite, cependant, est recruté, personne ne l'ignore, parmi les derniers élèves de l'Ecole polytechnique. Nos derniers élèves sont donc excellents, ils aiment, ils respectent, ils cultivent la science ; je voudrais ajouter : Jugez par là des autres ! la logique le permet, la vérité s'y refuse. Les derniers élèves d'une école savante qui s'est ouverte pour eux après de difficiles épreuves, ne sont pas les moins méritants ; dans ce concours sans répit ni trêve, ceux qui renoncent à la lutte y auraient fait souvent très honorable figure.

J'assistais un jour à la réunion du jury qui décide du sort des « fruits secs » repoussés des services publics. Sur la liste des victimes, à mon grand étonnement, je rencontrai le nom d'un jeune homme que l'opinion de ses camarades plaçait, je le savais, au premier rang. J'alléguai, pour le défendre, ses brillants examens d'admission, l'estime de ses premiers maîtres et des notes excellentes, de date déjà ancienne. Mon discours produisit un effet déplorable. « Il aurait pu être notre meilleur élève, s'écria un éminent ingénieur, et par sa paresse il est le dernier ! Je le déclare indigne d'indulgence. » Telle fut effectivement l'opinion du conseil, et le jeune homme dut quitter l'école. Plus d'un jury moins sévère a laissé passer, pour recruter l'artillerie de marine, quelques-uns de ces paresseux de la vingtième année, non moins riches d'avenir et plus habilement défendus.

Les recherches sur la force de la poudre inspirées par M. Deprez resteront mémorables dans l'histoire de ce

problème, toujours à l'étude. Elles méritent plus qu'une simple mention. La route à parcourir était longue ; Tartaglia croyait y faire un premier pas en démontrant que la trajectoire est une ligne courbe. « Une pierre qu'on lance, disait-il, décrit une courbe que chacun peut voir ; le boulet, personne n'en peut douter, finit par retomber sur la terre, et la trajectoire, pour l'y ramener, se courbe nécessairement tôt ou tard. Cette courbure, ajoute-t-il, est immédiate, elle commence dès la sortie de la pièce. » Voici comment il argumente : « Plus la vitesse est grande et plus on est rapproché du point de départ, moins la courbure peut être sensible ; cela peut être admis comme un axiome. Où trouver place alors pour une portion de ligne droite ? En accroissant la vitesse ou en se plaçant plus près de la pièce, on devrait, d'après l'axiome admis, obtenir une route moins courbée ; or, rien n'est moins courbé qu'une ligne droite, et l'hypothèse est contradictoire. » L'assertion n'est pas fausse ; mais, ingénieux ou non, un sophisme est toujours stérile. Pour découvrir la forme parabolique, Galilée avait tout à inventer. Le grand Italien négligeait la résistance de l'air, sans en ignorer l'influence. L'architecte-ingénieur Blondel, ami des problèmes faciles, ne rencontrait, dans « l'Art de jeter des bombes » qu'une application des propriétés de la troisième section conique. La théorie restait éloignée de la pratique et ne faisait pas un plus grand progrès le jour où La Hire, en 1702, devant l'Académie des Sciences, expliquait la force de la poudre par l'élasticité de l'air contenu dans les grains et entre les grains dilatés par la combustion.

L'excellent ouvrage de Robins, publié en 1742 et traduit dans toutes les langues, fut le point de départ de travaux plus exacts et qui peuvent, aujourd'hui encore, servir, sur plus d'un point, de guide aux artilleurs. Robins a le premier mesuré la vitesse du projectile ; la comparaison directe de l'espace parcouru au temps du trajet surpassait les ressources de l'art. Le mouvement, disait Robins, est si

rapide et le temps si court, que si, en le mesurant, on commet la moindre erreur, on pourra se tromper de 500 ou 600 pieds sur l'espace parcouru en une seconde. Les voies les plus assurées de la science sont indirectes ; c'est de l'effet du choc que Robins a déduit la vitesse. Le projectile, dans la méthode de Robins, frappe à bout portant un appareil mobile solidement construit en fer et protégé par une pièce de bois sur laquelle on tire. Il ne faut pas s'imaginer, disait Robins, que cette planche soit inutile. Si le boulet, chassé par une forte charge, frappait directement le fer, il briserait tout, serait réfléchi, et, indépendamment du danger auquel on serait exposé, on aurait le déplaisir de n'avoir rien avancé. On supprime aujourd'hui la planche qui mériterait, je crois, le nom de poutre, et le boulet reçu dans un lit de sable ou d'argile y éteint son mouvement, qu'il communique au pendule. On peut se fier à la formule de Robins, elle traduit une loi rigoureuse de la science ; le travail inconnu de destruction en est éliminé. Que le boulet ait déchiré des fibres de sapin ou de chêne, fait une trouée dans la terre ou broyé des grains de sable, la relation entre la masse en mouvement, la vitesse initiale et l'angle d'écartement du pendule restera la même.

La vitesse imprimée au boulet ne mesure pas le mérite d'une poudre. En préférant celle qui, à charge égale, procure le plus grand écart, on commettrait une grave imprudence. L'impulsion, mesurée par la force vive du boulet, est le travail total des gaz de la poudre, proportionnel à leur effort moyen ; mais pour une même moyenne les extrêmes varient, et les chances de rupture en dépendent. C'est l'effort maximum qui rend la poudre brisante. Si aucun produit chimique, jusqu'ici, n'est admis à charger nos canons, ce n'est pas l'énergie qui leur manque. Le chlorure d'azote, la dynamite, le picrate de potasse, le coton-poudre pourraient, sous un moindre volume, produire un aussi grand travail ; mais le ressort de ces substances est trop impétueux et trop raide, leurs gaz

se produisent trop vite, l'effort initial est trop grand ; après quelques coups, après un seul peut-être, l'arme la plus solide éclaterait sous leur action. La poudre, pour les armes à feu, est encore aujourd'hui sans rivale. Dans le travail des mines, pour briser la roche, la raideur du ressort est un avantage et la dynamite, pour remplacer la poudre, n'attend sans doute que l'abaissement des droits de fabrication et de vente.

Si j'avais à dire et à discuter les tentatives antérieures aux expériences de MM. Deprez et Sebert, la matière ne manquerait pas. J'ai désiré montrer seulement, de manière à ne laisser aucun doute, que la France possède, sans le savoir assez, un inventeur de premier ordre. Les excellents mémoires rédigés par le colonel Sebert apportent, par leur forme, un sérieux commencement de preuves. Une commission militaire est présidée par le savant général Frébault, elle a pour secrétaire un éminent professeur cité avec honneur dans l'histoire de la balistique, M. Hélie. A côté de plusieurs noms qui sortiraient de toutes les bouches s'il fallait louer la science de nos officiers et leur ardeur au progrès, cette commission inscrit celui d'un jeune homme sans grade et sans titre, recommandé par son seul mérite. On demande ses conseils, on les suit, on adopte ses projets ; il ne s'agit pas ici d'une inspiration heureuse qui ouvre la voie ; pendant trois ans entiers, ces officiers supérieurs, ces savants vieilliss dans l'étude, ces mécaniciens, passés maîtres dans l'art des expériences qui, avant et depuis, ont fait glorieusement leurs preuves, réalisent les projets de M. Marcel Deprez. Chaque difficulté lui procure un succès ; on arrive, je n'exagère rien, à lui commander des inventions. Le chronographe de Schultz est cité jusque-là comme le dernier effort de la science ; on rencontre, en l'appliquant, des difficultés considérables ; la précision justement vantée de l'appareil a des limites, il faut les franchir ou sinon l'entreprise devient inutile. On expose l'embarras à M. Deprez, on le presse d'y trouver

remède. Versé dans les combinaisons et dans les théories mécaniques, l'étude des courants lui était nouvelle ; mais il y a urgence, et il est « forcé » — je répète les paroles du colonel Sebert — de substituer au meilleur chronographe connu « un instrument réellement nouveau ».

La première méthode proposée par M. Deprez à la commission pourrait s'appeler mesure statique des pressions de la poudre. Elle repose sur le principe de Pascal : la pression d'un fluide se transmet dans tous les sens, et à toute distance, proportionnellement aux surfaces. Les mesures qu'on doit prendre et évaluer en kilogrammes peuvent donc, pour les pressions les plus grandes, être représentées par des nombres petits. La pression de la poudre, reçue sur un piston de petite surface, est transmise par une tige rigide à une surface cent fois plus grande et appliquée à presser une masse de mercure. La violence du choc, par cet artifice, est réduite au centième. La pression du mercure est transmise à des pistons de petite surface maintenus par des forces constantes successivement vaincues, et dont les plus grandes ne dépassent pas 20 kg.

Le plus difficile est de noter le moment où se déplace chaque piston ; à chacun correspond, pour les gaz, une pression déterminée à l'avance. La rapidité du phénomène est telle qu'il ne faut pas songer au chronomètre, et que les meilleurs chronographes forent trouvés d'abord insuffisants. Une méthode bien connue charge chaque mouvement qu'il faut noter de produire l'interruption d'un courant ; cette interruption fait naître une étincelle dont la trace, sur un papier en mouvement, marque l'instant précis du phénomène. Aucune action n'étant instantanée, il faut se résigner à un retard ; peu importerait s'il était constant. Ce sont les différences seules qu'on mesure. Malheureusement, l'étincelle présente des irrégularités dont la loi nous échappe. On a essayé de lui faire percer le papier, marquer une trace blanche sur du noir de fumée, colorer en bleu du cyanoferrure de potassium, rien ne

réussit ; l'étincelle se détourne sans cause appréciable, pour frapper le papier à un millimètre quelquefois de la route la plus courte. L'électricité frappe le point qui lui plaît ; c'est la seule loi qu'on ait trouvée.

Rebuté par ces difficultés, M. Marcel Deprez osa revenir à un mode d'enregistrement condamné par d'illustres juges. Le courant interrompu produit un électroaimant dont l'attraction sur une pièce de fer doux met en marche l'indicateur. Wheatstone et Regnault l'avaient essayé sans succès. Les actions mises en jeu demandaient un temps trop long ; M. Deprez a dû les réduire. Bornons nous à dire que pour hâter le départ de la pièce aimantée, il parvient à exercer sur elle une attraction égale à dix mille fois son poids, capable, par conséquent, de lui faire parcourir 50,000 m dans la première seconde ; le trajet est d'un seul millimètre. La méthode dynamique est venue confirmer les résultats de la méthode statique. L'accélérographe de M. Deprez, c'est sous ce nom que la commission, en le faisant connaître, l'a recommandé aux artilleurs, se compose d'un petit piston d'acier d'un demi-centimètre carié de surface et qui, traversant l'épaisseur des parois de la pièce, reçoit directement l'action des gaz. A l'extrémité libre de ce piston se trouve une masse très lourde en fer qui porte une petite plaque enduite de noir de fumée, contre laquelle appuie un style soumis à la traction d'un ressort de caoutchouc qui ne devient libre qu'au moment précis où le piston d'acier entre en mouvement par l'action des gaz de la poudre. Il résulte de la simultanéité de ces deux mouvements que le style trace sur la petite plaque une courbe dont l'étude fait connaître la loi des vitesses ; leurs accroissements, d'après les lois de la dynamique, donnent la mesure des forces qui les produisent. Ces expériences rigoureuses et précises ajoutent au mérite de la difficulté vaincue celui d'une simplicité justement admirée par les membres de la savante commission.

III. — M. Marcel Deprez, comme inventeur et comme savant, était déjà digne de grande estime, lorsque, bien jeune encore, il me soumit quelques idées nouvelles. Très sûr de lui, il me mit en défiance. Il parlait d'une voiture projetée qui devait rouler sur les plus mauvaises routes sans craindre cahots ni secousses ; une machine à résoudre les équations se rattachait au même principe, où la considération des vitesses virtuelles avait place. « Veuillez, lui dis je, me rappeler la définition de ces vitesses. » Un peu surpris peut-être, il énonça très correctement la règle subtile et profonde qui résume et contient la statique. « De quel droit, ajoutai je, appliquez-vous à une voiture en marche cette loi générale de l'équilibre ? » L'objection aurait troublé un ignorant ; elle fit sourire M. Deprez. Par curiosité, par habitude peut-être, je faisais succéder les questions aux questions, une matière menait à l'autre ; nous étions loin déjà de son carrosse, lorsque, se levant tout à coup, M. Marcel Deprez s'écria avec impatience : « Mais, monsieur, vous me faites passer un examen ! » C'était parfaitement vrai. « Vous m'avez fait, lui dis-je, l'honneur de me soumettre vos projets : je n'ose à première vue me prononcer ; j'y penserai avec attention ; je me serais dispensé de le faire s'ils reposaient sur de vagues sentiments des choses. La théorie est nécessaire pour inventer une machine, comme les pierres pour bâtir un mur. J'ai voulu vous juger, et je me demande, je vous l'avoue, où vous avez appris, et sous quel maître, à si bien parler de la science ! » La passion des machines l'avait entraîné ; la science, pour lui, était une lumière ; les formules, une arme nécessaire. Il me rappela Léon Foucault. Ces deux esprits, très différents par leurs ambitions et leurs goûts, se ressemblent par leurs aptitudes. A la science, dans laquelle ils auront excellé tous deux, l'un associait le talent et les goûts d'un artiste, l'autre, l'amour des applications utiles et la curiosité des grands travaux de l'industrie. Foucault, moins impatient,

partageait rarement son esprit ; il ne changeait de terrain qu'après avoir épuisé un succès et ne laissait paraître que des œuvres parfaites. On ignorait ses essais et ses doutes. M. Deprez parle volontiers de l'idée qui l'occupe ; il raconte les solutions entrevues, sans imposer le secret ni se préoccuper des droits de priorité, qu'il revendique toujours mollement et sans aigreur. Foucault pouvait, dès ses débuts, commander aux meilleurs constructeurs les instruments les plus délicats et entreprendre à ses frais les expériences les plus coûteuses ; M. Deprez, sans se ménager la faveur de personne, laissait à de mieux placés ou à de plus riches l'honneur et le soin de réaliser ses inventions. Jamais Léon Foucault n'aurait abandonné à une commission souveraine le droit de discuter ses projets, de rejeter les uns, de perfectionner les autres, sans prendre conseil que du but à atteindre. M. Deprez l'a fait, il n'a pas eu à le regretter. Le hasard l'a bien servi. Il a rencontré chez de savants et loyaux officiers la curiosité, l'esprit de suite, le discernement du mérite et le désintéressement scientifique. Les artilleurs et les marins, il est heureux de le répéter, l'ont accueilli avec cordialité et traité avec justice. L'invention en commun n'en est pas moins pleine de périls, on le lui fit bien voir. Un projet ingénieux communiqué, à son ordinaire, à tous ceux qu'il intéressait, donna naissance au wagon d'expérience admiré au Champ-de-Mars, en 1878, dans l'exposition d'une de nos grandes compagnies de chemins de fer. M. Deprez, pendant plus de deux ans, a appliqué à ce travail les ressources de son esprit, livrant tout sans compter, comme dans ses travaux sur la poudre. Ni l'ardeur ne fut moindre, ni l'assiduité ; le génie inventif était le même et les difficultés aussi grandes. Le résultat fut différent. J'ai sous les yeux une notice sur les travaux de M. Marcel Deprez : devenue inutile avant le tirage, elle n'a pas été distribuée. Un second exemplaire en serait introuvable. A l'occasion du beau travail sur les locomotives, où il a eu tant de part, je lis les lignes

suivantes et je les cite comme un trait de caractère : « M. Deprez, c'est lui-même qui parle, a trouvé depuis une solution incomparablement plus simple ; il n'a reçu d'ailleurs ni rémunération d'aucune sorte, ni remerciement de la Compagnie, qui ne lui a même pas adressé un exemplaire de la brochure descriptive du wagon, dans laquelle son nom ne figure pas ».

On a reproché à Le Verrier, avec une indignation que je n'ai jamais partagée, d'annoncer quelquefois des observations du ciel sans y attacher le nom d'aucun observateur. L'Observatoire de Paris, collectivement, en réclamait l'honneur. Voici comment les choses se passaient : quand, pour des raisons qu'il ne disait pas, le grand astronome désirait explorer un coin du ciel, il invitait les observateurs de service à vérifier sur une carte, qu'il leur remettait, la position des étoiles inscrites. « S'il apparaîtrait, disait-il, la moindre discordance entre le ciel et le dessin, pressez ce bouton ; averti aussitôt, vous me verrez accourir, et je me charge du reste ». Lorsque le reste devenait une découverte, l'observateur se plaignait, comme je ne sais quel capitaine du seizième siècle, « d'avoir été de l'entreprise sans être de la prise ». On le défendait avec aigreur ; le procédé du maître était déclaré inique et les journalistes, en prenant pour l'observateur fait et cause, eussent été bien malhabiles en ne faisant pas de la victime un savant plein d'avenir, un astronome éminent, qui sait peut-être même un rival importun de son chef.

Le cas de M. Deprez est tout autre. Le Verrier se servait du travail, non des idées d'autrui. Lorsqu'il envoyait à Marseille le grand télescope de Foucault, il ne l'annonçait nullement comme une œuvre de l'Observatoire de Paris ; il eût, s'il l'avait fait, mérité de justes reproches. Léon Foucault, prompt à la riposte, n'en aurait pas sans doute adouci la forme. M. Marcel Deprez, dans un cas semblable, hausserait les épaules et continuerait ses travaux. Lorsque

ses machines marchent bien, il se trouve payé de ses peines.

Le problème à résoudre dans le wagon que M. Deprez nommait dynamomètre, était de représenter graphiquement le travail développé, pendant la marche, par le piston de la locomotive ; un coup d'œil rapidement jeté sur cet ingénieux et grand travail, en 1878 d'abord, puis en 1881, à l'Exposition internationale d'Electricité, m'a laissé le souvenir d'une œuvre originale et pleine d'élégance. Trop de détails m'échappent aujourd'hui, et la notice rédigée par M. Deprez ne peut y suppléer. J'y lis, en effet, en y cherchant des renseignements précis que je voudrais transcrire : « Il serait impossible de donner une idée, même superficielle, des appareils que M. Deprez fut obligé d'imaginer ». Reproduisons seulement cette autre phrase : « Le wagon figura à l'Exposition universelle de 1878 et valut à M. Deprez une médaille d'or de collaborateur qui lui fut décernée collectivement avec deux ingénieurs de la compagnie ». L'analyse de ce beau travail aurait suffi pour montrer les ressources imprévues et variées de l'esprit inventif que nous étudions. Heureusement, pour les rendre évidentes, nous n'avons que l'embarras du choix.

IV. — M. Marcel Deprez faisait un jour, devant quelques savants, l'épreuve d'un régulateur. Le compteur accusait dix tours par seconde, cent en dix secondes, mille en cent secondes ; on diminuait la résistance, on la supprimait même, sans obtenir le plus faible écart. Un organe invisible maîtrisait la vitesse. Le courant, dit-il, traverse un ressort tournant ; la force centrifuge, en le relevant, supprime la force motrice pour la rétablir instantanément, voilà tout le secret. « Le courant ! Il y a un courant ! », s'écria un représentant respecté de la mécanique. La solution ne l'intéressait plus. L'intervention de l'électricité lui était suspecte d'escamotage. Ces forces qui naissent à volonté,

disparaissent, changent de sens au premier signe, donnent au physicien trop beau jeu ; une rotation se communique sans engrenages et sans courroies, est renversée sans embrayage, se ralentit sans frein ; on ne reconnaît plus la mécanique. Semblable était, au commencement de ce siècle, la mauvaise humeur des vieux joueurs de billard, lorsque battus par des adversaires novices initiés aux effets de queue, ils voyaient, de leurs yeux, réussir des coups impossibles. On s'habitue à tout, l'électricité est en grand crédit ; les mécaniciens l'étudient et l'emploient comme ils ont étudié et employé la vapeur, comme Bayard autrefois, tout en regrettant les beaux coups de lance, s'est résigné à faire parler la poudre.

Qui pourrait définir un courant ? Un fil métallique, en réunissant les deux pôles d'une pile, devient l'instrument des merveilles que ce nom résume et rappelle. Les courants, c'est ainsi qu'on les nomme, sans décider qu'aucun fluide y circule, s'attirent ou se repoussent, attirent ou repoussent les aimants, les font naître, produisent les températures les plus hautes et la lumière la plus éclatante, et sont enfin l'agent des dépôts galvanoplastiques. Chacun de ces effets s'accroît avec l'intensité du courant à laquelle il pourrait servir de mesure. Si, cependant, pour connaître un courant, on s'informait de l'intensité seule, la déception serait dangereuse. La tension aussi joue un rôle, c'est elle qui détermine l'énergie du choc auquel on s'expose en le touchant. Un courant de faible intensité peut avoir une grande tension ; un autre, d'intensité cent fois plus grande, une tension très petite. Le premier tuera un bœuf en faisant dévier de quelques degrés à peine l'aiguille du galvanomètre qui mesure l'intensité, et l'autre fera faire à l'aiguille plusieurs tours de cadran, sans pouvoir étourdir une souris. On pourrait classer et définir les tensions en disant quelles sortes d'animaux peuvent être foudroyés.

Les physiciens emploient d'autres mesures. L'unité de tension est le volt et l'unité d'intensité, l'ampère. L'intensité, pour chaque courant, est la même en tous ses points ; la tension, au contraire, varie d'un point à l'autre ; si elle était constante, il n'y aurait pas de courant. On peut, en suivant une image suggérée par le nom lui-même, comparer le courant à un fleuve ; l'intensité correspond à la quantité d'eau débitée à travers une section transversale ; elle est la même, en différents points, tant qu'aucun affluent ne l'augmente et qu'aucune dérivation ne la diminue. La tension peut être comparée à l'altitude, qui diminue quand on descend le cours de l'eau. Sans la différence des altitudes le fleuve resterait lac ; sans la différence des tensions l'électricité resterait statique. Le danger des inondations dépend du niveau des eaux, le danger du choc électrique dépend de la tension. Le choc qui foudroie est une inondation d'électricité. C'est la différence des tensions extrêmes, qui, semblable à une hauteur de chute, détermine la naissance du courant ; elle se nomme force électromotrice.

Un torrent impétueux, pour continuer le rapprochement, qui, avec un faible débit, balaye tout sur son passage, en tombant de la montagne à la plaine, présente l'image d'un courant de grande tension. Un fleuve large et profond qui, dans un lit presque horizontal, roule lentement d'immenses eaux, représente au contraire un courant de grande intensité. Le galvanomètre sert à mesurer les intensités ; il consistait, dans tous les cabinets de physique, en une aiguille aimantée très légère, dirigée par la terre ; le courant, par un grand nombre de circonvolutions, multiplie sur elle son action, et la déviation qu'il procure donne la mesure de l'intensité. M. Deprez a apporté à cet instrument indispensable de toutes les études électriques un perfectionnement de grande importance. C'est une maxime pour lui que dans les instruments de mesure, on doit accroître le rapport de la force mise en jeu à la masse qu'il

faut mouvoir. L'action exercée sur un aimant est proportionnelle à l'énergie de l'aimantation M. Deprez remplace, en conséquence, l'aiguille par une pièce de fer dite, à cause de sa forme, « arête de poisson », placée entre les branches d'un puissant aimant qui la dirige énergiquement. On peut, grâce à cet artifice, obtenir en quelques secondes, avec grande exactitude, des mesures qui exigeaient plusieurs minutes. Le galvanomètre de M. Deprez est aujourd'hui complètement adopté.

La puissance de travail, l'énergie d'un courant, comme on dit, a pour mesure, sous quelque forme qu'il se manifeste, le produit de l'intensité par la force électromotrice. L'énergie d'une chute d'eau a pour mesure le produit de la hauteur de chute par le poids de l'eau débitée.

L'intensité, à première vue, paraît tout régler. L'effet d'un courant, quel que soit l'usage qu'on en fasse, lui est proportionnel et dépend d'elle seule. Cela est vrai tant qu'elle se maintient ; mais, par le travail, un courant s'affaiblit ; semblable, sans cela, au Juif errant de la légende, très riche avec ses cinq sous, il aurait une puissance infinie. Cela répugne aux principes. L'intensité est diminuée par le travail et diminuée très inégalement. Deux courants d'intensité égale sont capables de la même force, non du même travail ; tels seraient deux chevaux de vigueur égale, capables au départ du même effort, dont l'un pourrait le prolonger sans faiblir pendant une heure entière, tandis que l'autre, dès la première minute, tomberait épuisé de fatigue. Deux courants de même intensité, appliqués à un même usage, à l'éclairage par exemple, peuvent donner des résultats très différents. Il peut se faire que l'un s'affaiblisse sans produire de lumière, et l'autre éclaire presque sans s'affaiblir.

Les courants produits par la pile sont trop coûteux pour l'industrie. Jacobi, dès l'année 1838, n'en faisait pas moins manœuvrer sur la Neva, sous l'influence d'une pile, un bateau portant huit personnes. L'empereur de Russie, qui

payait les frais, ne s'informait ni du nombre de chevaux mis en jeu, ni du prix de chacun ; on obtenait, je crois, un demi cheval, et la dépense n'avait pas besoin d'être multipliée par deux pour être fort grande. Dans les machines électromagnétiques, la rotation d'un aimant d'abord, puis celle d'une pièce de fer aimantée par la machine elle-même, en produisant des forces électromotrices presque indéfinies, ont changé les conditions du problème. Un aimant tourne sous l'influence d'une force purement mécanique, il produit un courant dans un fil enroulé près de lui ; ce courant, portant au loin l'action, fait tourner un second aimant dont la rotation permet d'accomplir un travail. Pourquoi, dira-t-on, faire tourner un premier aimant pour obtenir, avec perte de force, en faisant intervenir deux machines, la rotation d'un second aimant ? La perte de force est regrettable assurément et deux machines coûtent plus cher qu'une seule, mais les inconvénients sont compensés, et au delà, par la possibilité de choisir à son gré la place de la puissance motrice et les outils qu'elle conduit.

Une charrue, par exemple, dans une expérience célèbre, était tirée par l'action d'un courant. La machine génératrice, installée dans le village, aurait pu envoyer successivement, simultanément même, si on l'avait faite assez puissante, dans tous les champs de la commune, la force nécessaire au labourage. Dans cette belle expérience, si décisive en apparence, la distance était petite et la force peu considérable. Il serait aisé d'allonger le fil ; pourquoi ne pas lui donner 20000 m au lieu de 500 ?

C'est que si l'on donne au fil 20000 m au lieu de 500, il sera quarante fois plus long, la résistance au passage du courant s'accroîtra dans ce long chemin et l'énergie, affaiblie, ne suffira plus au travail. On pourrait obtenir dans ce fil de 20 km un courant d'intensité suffisante et faire la compensation en accroissant la force électromotrice ; il suffirait de faire tourner rapidement la machine. Il y aurait

beau jeu, mais la corde romprait. La force centrifuge casserait tout. On pourrait, il est vrai, assurer le succès sans changer le régime de la machine, en choisissant un conducteur plus gros. Si, en conservant le même métal, c'était du cuivre, on rend le diamètre six fois plus grand, on aura compensé précisément la multiplication de la longueur par 36. On pourra envoyer la force à 18 km, comme on le faisait à 500 m. les conditions resteront les mêmes. Mais un fil de 36 km, puisqu'il faut compter le retour, coûterait tout au moins 200 000 fr. C'est là l'objection, et elle est sérieuse. Un fil de fer ne réussirait pas, étant à section égale, cinq fois moins conducteur que le cuivre.

La possibilité de transporter la force par un fil conducteur n'est plus, depuis dix ans au moins, contestée. Mais il faut pour cela, ou de gros fils ou de grandes tensions. On repousse la première condition par économie, la seconde par prudence. On a reproché enfin à la transmission électrique de procurer une grande perte de force. Le rendement est petit : telle est la forme de l'objection répétée sans cesse. Après chaque expérience, c'est du rendement qu'on s'informe ; par bienveillance, il n'en faut pas douter, pour se réjouir si la fraction est grande. On reste prêt toutefois, si elle se trouve petite, à condamner la méthode en plaignant la force perdue. C'est une fausse opinion. Le travail doit se faire et ne pas trop coûter. Voilà la règle. La force perdue, par elle même, est ce que l'on doit le moins considérer. Si l'on pouvait transporter à New York les 17 millions de chevaux qu'un mécanicien voit tomber du Niagara, qu'importerait d'en perdre les neuf dixièmes en route ? Que penserait-on d'un savant qui, sachant démontrer que tout choc fait perdre du travail, regretterait la force perdue quand on forge du fer ?

On pourrait aisément accroître le rendement, mais il n'y aurait qu'à y perdre. Enonçons les données du problème.

Nous supposons deux machines : l'une, la génératrice, destinée à produire le courant, l'autre, la réceptrice, qui tournera sous son influence. La machine génératrice dépense ou, comme on dit, absorbe du travail ; la réceptrice en produit. Le rapport du travail produit au travail dépensé est le rendement. Les deux machines étant, l'une et l'autre, étudiées et bien connues, si l'on demande quel sera le rendement, un ignorant seul peut répondre. Tout dépend de la manière d'opérer. Le rendement peut varier, suivant le régime adopté, entre 0 et 100 pour 100.

Si le rendement peut grandir, il ne semble pas qu'on soit en doute du choix. Le plus grand sera le meilleur. Il n'en est rien. Quelques détails le feront comprendre. Le courant, nous l'avons dit, s'affaiblit en travaillant, et cela est conforme à toute prévision raisonnable ; mais, dans la transmission de la force, un autre phénomène se produit, très étranger et paradoxal, à n'employer que le jugement commun.

Pendant qu'elle travaille, la machine réceptrice diminue l'effort nécessaire pour faire tourner la génératrice, dont la vitesse reste cependant constante. Toutes les règles par là semblent renversées. Tout travail utile est résistant ; plus une machine en produit, plus elle consomme de force. Les machines électriques font exception.

Expliquons cette anomalie. Le courant engendré par une machine agit sur l'aimant qui lui donne naissance, et la force, par une loi nécessaire, tend à ralentir le mouvement ; c'est cette résistance que doit vaincre, pour maintenir la vitesse, la puissance motrice de la génératrice, et le travail pour elle sera d'autant moindre que le courant contre lequel elle lutte, en lui donnant naissance, sera moins intense. Lors donc que le courant est affaibli, par son propre travail ou autrement, peu importe, il résiste avec moins de force et le moteur est soulagé.

Il ne faut pas, dans ce singulier phénomène, voir une économie de travail ; l'illusion serait manifeste. S'il y avait

profit à ce genre d'influence, on pourrait l'imiter, quel que soit le moteur : un cheval, à l'aide d'un manège, met en marche une machine ; qui empêcherait d'emprunter une partie de l'effet produit pour pousser à la roue et soulager le moteur ? La maladresse serait grande : l'attelage, il est vrai, ne se fatiguerait guère, mais un fort cheval, par ce moyen, pourrait produire le travail d'un âne. Si l'on accroissait le rendement en augmentant purement et simplement le travail produit, il n'y aurait qu'à gagner ; si c'était en diminuant le travail dépensé, le profit ne serait pas moins évident. S'il faut les diminuer tous deux, la question mérite qu'on la pose : il faut l'étudier.

Un industriel compte, pour faire marcher son usine, sur une chute de 20 ch de force, située à 20 km. L'ingénieur fait construire et installe deux machines reliées par un fil et déclare, triomphant, qu'avec une dépense de 4 ch appliqués à la génératrice, la machine réceptrice en produit 3. Le rendement est 75 pour 100. Comment ce beau succès sera-t-il accueilli ? L'industriel ne vous dira t-il pas : « Je mets 20 ch à votre disposition, vous m'en transportez 3, vos machines ne rendent que 15 pour 100 ». Il serait injuste ; les chevaux sans emploi ne sont pas perdus ; la distinction n'a rien de subtil : quatre machines semblables à la première, sur les 16 ch sans ouvrage, pourront en amener 12, à la condition de leur adjoindre quatre réceptrices nouvelles. C'est la solution proposée par M. Maurice Lévy et adoptée par M. Boistel, ingénieur de l'éminent et savant constructeur Siemens, qui, nous l'apprend M. Tresca, pour transporter 200 ch à 50 km, proposait récemment de commander 20 machines et 1000 km de fil. Le fil seul coûterait plus d'un million et demi de francs.

M. Marcel Deprez repousse absolument cette solution.

V. — L'application des courants à l'industrie est une conquête assurée. L'histoire de ses progrès n'est pas de

mon sujet. Qui oserait, aujourd'hui, en assigner les limites ? Si rapides qu'elles soient, les espérances vont plus vite encore. Sans oublier le but de cet article, j'indiquerai seulement quelques-uns des problèmes auxquels M. Marcel Deprez a associé son nom.

Laissant de côté les détails, quelques-uns de grande importance, j'aborde la grande question du transport de la force dont, avant aucun autre, il s'est rendu maître. A l'Exposition d'Electricité de Paris, en 1881, un grand nombre de machines à coudre, de presses d'imprimerie, de perforateurs à pointe de diamant, de pompes, de pilons, d'ascenseurs, de charrues, dont l'électricité était le moteur, semblaient faire un jeu d'un problème définitivement résolu.

Quel problème ? Transporter une force à quelques centaines de mètres par un fil conducteur et en obtenir un travail.

Il reste à accroître la distance sans diminuer le travail, en l'augmentant même, cela est indispensable. La théorie, qui toujours doit guider la pratique, est condamnée cette fois à préparer les voies jusqu'au détail. Une machine de 1000 ch est une grande et hasardeuse entreprise. Qui oserait la tenter sans avoir tout calculé et prévu ? Que peut-on, d'abord, espérer des machines, aujourd'hui nombreuses, que l'on rencontre dans le commerce, et dans quelles proportions est-il possible, sans modification profonde, de les accommoder aux exigences d'un travail lointain ?

Tel est le premier problème résolu par M. Deprez avec une savante hardiesse, pleinement justifiée par le succès.

Plusieurs méthodes se présentent ; quelques-unes, si naturellement, qu'aucun inventeur ne serait admis à les réclamer comme siennes. On peut accroître la grosseur du fil, doubler, quadrupler, décupler suivant les cas, la vitesse de la machine. Les droits à de telles inventions ne seront pas discutés ; elles sont impraticables. Elles feraient songer, par un complet échec, à l'opposition, cette fois

presque juste, entre la théorie et la pratique. M. Deprez, à son ordinaire, a su puiser la solution dans les principes mêmes de la théorie. Elle consiste à rendre aussi fin que possible le fil de cuivre dans lequel le courant prend naissance.

Si un constructeur ayant par hasard à sa disposition quelques kilomètres de fil cinquante fois trop fin, s'était décidé, pour ne rien perdre, à les employer sans rien dire, dans la construction d'une machine dynamoélectrique, il réclamerait aujourd'hui la découverte et n'aurait pas eu grand mérite. On en accorde beaucoup à M. Deprez. Voyez l'injustice ! Nullement : n'est-ce rien d'avoir eu la science, non le hasard, pour guide ? L'idée de M. Deprez est très judicieuse. Le courant, dans un fil, ne naît pas en un point ; il est engendré dans chaque élément ; le courant total est la somme de ceux qui prennent naissance, en nombre infini, superposés dans le même conducteur. La longueur du fil, nuisible dans le conducteur qui transporte la force, est donc avantageuse dans celui qui l'engendre. C'est pour pouvoir l'allonger sans éloigner son action que M. Deprez le rend plus mince. Une objection se présente : ce fil qui produit le courant doit aussi le conduire. En devenant plus mince et plus long, il apporte dans le courant une plus grande résistance. L'objection est spécieuse. Deux effets contraires sont en présence. Il faut les comparer. Maître d'une théorie merveilleusement simple et qui montre tout sur une seule figure, M. Deprez possède tous les éléments. Le fil étant cinquante fois plus mince et en même temps cinquante fois plus long, puisque l'espace occupé reste le même, la résistance sera deux mille cinq cents fois plus grande. Il s'agit, on ne l'oublie pas, de porter remède à un accroissement de résistance ; la méthode n'est-elle pas singulièrement hardie ? Mais les chiffres ne craignent rien. M. Deprez, continuant son enquête, trouve, pour une même vitesse de la machine, une force électromotrice cinquante fois plus grande. L'effet nuisible est multiplié par 2500 et

l'effet favorable par 50. Doit-on conclure au rejet ? Pas encore, répond M. Deprez. La résistance multipliée par 2500 n'est pas la résistance totale, le long fil qui sépare les machines est resté le même ; c'est la force électromotrice tout entière qui est multipliée par 50. La comparaison est donc permise et elle prononce en faveur du fil mince.

Trois essais tentés jusqu'ici ont réussi tous trois sans mécompte, avec un retentissement immense. Sur la demande de la Commission technique d'Electricité de l'Exposition de Munich en 1882, M. Marcel Deprez essaya, pour la première fois, dans les conditions qu'il avait depuis longtemps déclarées réalisables, le transport de la force à une distance de 57 km. La machine génératrice fut placée à Miesbach et la machine réceptrice à Munich dans la grande nef de l'exposition. Les machines étaient peu puissantes ; la force transportée était d'un demi-cheval environ, et le rendement, 38 pour 100. La commission, heureuse d'un résultat qu'elle n'espérait pas, et conforme entièrement aux promesses du savant français, l'annonçait avec empressement à l'Académie des Sciences par dépêche télégraphique. M. Marcel Deprez, de retour à Paris, fit construire une machine électrodynamique plus puissante, et devant une commission nommée par l'Académie des Sciences, transporta par un fil de fer télégraphique, allant de Paris au Bourget, revenant à Paris et parcourant ainsi une longueur totale de 17 km, une force de 4 ch. La commission constatait un rendement de 0,48, rapport de la puissance développée par la réceptrice à la force réellement transmise à la machine génératrice. A Grenoble enfin, il y a quelques semaines à peine, M. Deprez, recueillant la force à 14 km, avec les machines mêmes employées à Paris, en substituant, cette fois, un fil de cuivre au fil de fer télégraphique moins conducteur, a obtenu un travail de 7 ch avec un rendement de 60 pour 100.

Les années d'apprentissage sont terminées. Les petites machines sortent triomphantes de l'épreuve ; c'est aux grandes à entrer en lice. Ce n'est pas 7 ch qu'il importe d'obtenir, l'industrie les demande par milliers. De nombreux cours d'eau vont chaque jour les plonger dans la mer, dont les marées sont prêtes à les faire sortir. Pour de grandes forces, il faut de grandes machines. La puissance d'une machine dynamoélectrique, lorsque tous les éléments géométriques grandissent en même temps, est proportionnelle à leur quatrième puissance. Une machine de dimensions doubles produirait, pour une même vitesse de rotation, seize fois plus de force. Si les dimensions sont triples, toujours sans changer le nombre de tours accomplis par minute, la force sera multipliée par 81, quatrième puissance du nombre trois. Si l'on pouvait décupler les dimensions, la puissance serait multipliée par 10000, mais la force centrifuge casserait tout.

En supposant que l'on dispose d'une chute d'eau capable d'une force de 500 ch, cette force serait absorbée par une machine de dimensions triples de celles de la machine Gramme ordinaire. Le fil aurait 0,014 m de diamètre et pourrait conduire à 50 km une force de 500 ch.

Dans une grande machine, tout est grand, même les dangers qu'il faut regarder en face ; ils sont prévus ; on saura les vaincre. La tension sera de 7500 v. C'est la mort assurée pour qui touchera les conducteurs : chacun sera prévenu. Est-il plus rassurant de vivre auprès d'un engrenage ? Les masses, dans une machine trois fois plus grande, seront multipliées par 27 et la force centrifuge, aussi bien que la puissance de la machine, aura pour multiplicateur 81. Chaque pièce de la machine tournant avec une vitesse de 10 t : s, dans un cercle de 0,50 m de rayon, fera naître une force centrifuge égale à près de 200 fois son poids. Pas de surprise ! tout est calculé, il faudra construire avec soin, cintrer avec précision, isoler avec

sollicitude et tout vérifier sans relâche jusqu'au grand jour de l'épreuve.

Lorsque, réalisant ces projets, étudiés dès à présent dans toute leur suite, qu'une théorie très assurée permettra de varier dans les limites très étendues, car le nombre des solutions est infini, on pourra amener dans une grande ville (à Grenoble, par exemple, elle a acquis le droit de marcher la première) quelques milliers de chevaux électriques, il faudra partager et régler leur action. La question est épineuse. Il faut conduire chez chacun la force qu'il désire et la mesurer pour qu'il la paie, sans troubler pour cela son travail ; faire en sorte, en même temps que l'irrégularité de sa marche ne puisse gêner en rien la jouissance, libre aussi, du voisin.

M. Marcel Deprez a mérité, à l'Exposition de 1881, la récompense exceptionnelle du grand diplôme d'honneur pour l'ingénieuse solution de ces problèmes.

L'étude des détails est fort intéressante ; ils s'expliquent tous, mais beaucoup sont imprévus.

Pour faire marcher, à l'aide d'une seule machine génératrice, plusieurs réceptrices à la fois, on peut choisir entre deux systèmes. Les machines peuvent être placées en dérivation ou en série ; en dérivation, elles sont conduites par des courants distincts nés du partage en autant de branches, d'intensité inégale si l'on veut, du courant produit par la génératrice.

Dans la distribution en série, c'est un seul et même courant qui passe d'une machine à l'autre, laissant, pendant son action sur chacune, une partie de sa tension, non de son intensité, toujours constante dans le courant unique. Plaçons-nous dans le premier cas : une même génératrice conduit, je suppose, dix réceptrices dont chacune produit un travail. Tout marche régulièrement : on supprime tout à coup cinq réceptrices, leurs courants sont interrompus. Qu'arrivera-t-il ? Ces données ne sont pas suffisantes pour le dire, mais le résultat sera certainement

imprévu. La force sans emploi, loin de se distribuer entre les courants qui restent, pour les rendre plus intenses, les affaiblira en disparaissant ; il pourra même arriver qu'elle les réduise à rien et que tout s'arrête.

Tel serait, dans l'ordre moral, le cas d'un homme habitué à un grand travail et qui, voyant supprimer la moitié de sa tâche, se croiserait les bras et ne voudrait plus rien faire. Quels que soient ses motifs, ceux du courant sont autres.

La vitesse de la génératrice étant donnée, si le courant produit est partagé en dix branches distinctes, il en résultera pour lui un accroissement immédiat. Chacun des dix courants, bien entendu, sera moins fort que le courant primitif, mais leur somme, c'est-à-dire le courant sur lequel ils s'embranchent, sera singulièrement augmentée. Cela résulte, pour le dire en deux mots, de ce que les dix fils équivalent à un fil dix fois plus gros, de résistance dix fois moindre ; on ouvre à l'électricité des canaux plus larges, il s'en précipitera davantage. C'est affaire à la machine motrice de fournir le travail nécessaire qui, par là, lui sera imposé. Tout se paie très exactement. On s'étonnera moins maintenant qu'en supprimant quelques-unes des machines, l'effet produit puisse être une diminution d'intensité dans les fils qui desservent les machines restantes. Mais une autre cause intervient. L'aimantation des pièces de fer et la force électromotrice diminuent, pour une même vitesse, avec l'intensité du courant, et toute cause qui vient à l'affaiblir tarit, par conséquent, en partie, la force qui l'alimente. Contrairement à toute prévision, la machine, au moment où l'on diminue son travail, a besoin d'un excitateur, non d'un frein. M. Deprez charge de ce soin un courant qui excite les aimants et qui, dans les premiers essais, indépendant du courant principal, est maintenant, par un artifice ingénieux, emprunté à la machine elle-même : un mécanisme justifié par de savants calculs dirige tout sans l'intervention d'une main étrangère.

En série, le cas est tout autre : un même courant traverse plusieurs machines ; si on en supprime quelques-unes, l'intensité s'accroît, et par cela même, la génératrice, excitée davantage, augmente, pour une même vitesse, la force électromotrice ; les machines conservées, au lieu de manquer de force, comme dans le cas précédent, vont la recevoir avec excès. Le mal est contraire, le remède sera le même ; c'est un fil excitateur que M. Deprez fait agir et dont l'effet est d'autant moindre que le courant devient plus fort. Ce courant, emprunté à la machine, n'exige aucune manœuvre.

« Cette solution, a dit M. Alfred Potier, rapporteur de la Commission des Moteurs à l'Exposition de 1881, est jusqu'ici la seule qu'on ait obtenue sans le secours d'agents mécaniques, dont l'action n'est jamais assez instantanée pour supprimer les variations du courant qui, dans un temps très court, peuvent causer des dommages sérieux ».

VI. — Lorsque M. Hase, conservateur des manuscrits à la Bibliothèque nationale, faisait à un curieux de science médiocre les honneurs des richesses confiées à sa garde, il choisissait et ne variait guère. Après avoir montré une tragédie de La Fontaine (inédite, je crois) et interrompu sa lecture au troisième vers, pour s'écrier avec finesse :

Ne forçons pas notre talent,
Nous ne ferions rien avec grâce,

il passait aux albums du bon roi René. René, s'il faut en croire ce philologue érudit, qui savait tout, aimait passionnément les fêtes, les troupes de belles dames richement parées, les cavalcades, les chasses au faucon et, en toutes choses, le faste d'un grand prince. Trop pauvre

dans son royaume de Provence pour s'entourer de tant de splendeurs, le bon roi les tournait en peinture. L'album du roi René est la confidence de ses rêves. M. Deprez, comme le roi René, a fait de beaux rêves, que les circonstances souvent n'ont pas permis de réaliser. Malheureusement il écrit peu, les projets restent dans sa tête ; il les dessine sur des feuilles volantes et les rédige avec paresse à ses moments perdus, qui sont rares.

J'ai eu, depuis dix ans, bien souvent le plaisir de causer avec lui, jamais sans qu'il m'ait fait part de quelque conception qui, invraisemblable souvent par sa hardiesse, devenait après ses explications très plausible et très simple. Tels devaient être dans le passé, non pas que les caractères se ressemblent, J.-B. Porta, l'ingénieux inventeur de la chambre obscure, et Robert Hooke, si souvent, si injustement maltraité par les admirateurs du grand Newton dont l'imprudent s'est cru le rival.

Hooke et Porta ont laissé dans leurs livres le germe d'innombrables inventions qui, jugées incroyables et impossibles d'abord, éclosent et mûrissent, de loin en loin, dans le cerveau de quelque inventeur, dont elles font la gloire.

M. Deprez n'écrira rien, mais il est jeune et actif, sait mener de front plusieurs travaux ; on peut espérer que, reprenant ses plus heureuses idées, il ne laissera à aucun autre l'honneur et le soin de les dégager de leur gangue. J'énumère en abrégeant ; l'article sans cela dépasserait toute limite.

Les erreurs personnelles désespèrent les astronomes ; leurs yeux avancent ou retardent l'apparition d'un phénomène ; pour noter le passage d'une étoile, un enregistreur serait utile. Chacun, sur un tel énoncé, doit penser à la photographie. La solution n'est pas acceptable, celle de M. Deprez est autre. Disposez une lunette de telle sorte qu'un fil très fin cache complètement l'astre étudié et faites en sorte que, dirigé par une machine parallactique, le

fil suive exactement le mouvement de l'astre ; on n'aura à noter que le passage du fil, et la difficulté descend du ciel sur la terre.

Pour mesurer la vitesse d'un boulet, on a proposé plusieurs méthodes et M. Deprez a marqué sa place dans l'histoire de ce grand problème. Le projet de se servir simplement d'une lunette et de lire sa vitesse en le regardant passer, après l'avoir rendu visible, soit en le portant au rouge, soit en lui attachant une fusée, est assurément un problème difficile. M. Deprez trouve moyen de le résoudre : il agite l'image du boulet, et le nombre des oscillations, pendant le passage dans le champ de l'instrument, donnera la mesure cherchée.

Un autre jour, c'était une boussole électrique dont il me confiait le principe. Je ne trahirai pas le secret en disant qu'un courant, né de l'action du magnétisme terrestre, devient nul quand une certaine aiguille est placée dans le méridien magnétique. La précision sera aussi grande que le constructeur l'aura voulu. L'instrument est entièrement en cuivre.

M. Deprez, s'inspirant du principe qui, dans son galvanomètre à arête de poisson, a si bien réussi — l'indicateur, dans un instrument de mesure, doit être puissamment maîtrisé, — se proposait, un jour, de construire une balance qui, placée près d'un puits de mine, pourrait peser deux ou trois cents bennes à l'heure, inscrire le poids de chacune et, à la fin de la journée, se charger elle-même de l'addition. L'enregistrement et l'addition par machine ne sont pas des nouveautés, la rapidité des pesées fait tout le progrès ; il serait de haute importance.

Je ne parlerai d'une machine à résoudre les équations que pour rappeler une objection faite par un savant professeur de l'Ecole des Mines, J. Callon, et qui d'abord troubla l'inventeur. La machine est construite de telle sorte, qu'après avoir disposé des poids donnés en des

positions assignées par les coefficients des différents termes, la position d'équilibre fait connaître la racine. « S'il n'y a pas de racine réelle, dit M. Callon, vous avez donc obtenu le mouvement perpétuel ». M. Deprez resta sans réponse. Il dut revoir sa machine sur le papier, où elle est encore, pour y découvrir un poids, représentant le terme tout connu, et qui, descendant toujours, laisse le mouvement sans fin de la machine s'accorder avec les principes. Cette machine se rattache à un principe fort simple, dont les conséquences nombreuses, assemblées par M. Deprez au temps de ses premières études, montraient déjà aux juges clairvoyants l'esprit original et fécond, inventeur de beaux problèmes, habile à les résoudre et persévérant dans sa voie.

La roulette logarithmique, qui donne mécaniquement les logarithmes, l'intégromètre et la réglette pour le calcul de l'effet des tiroirs forment une série de déductions à laquelle appartient le ressort qui se raccourcit et s'allonge sans cesser de faire équilibre à un poids constant, fort admirées, il y a une quinzaine d'années déjà, de ceux qui en eurent connaissance.

Le moteur électrique de M. Deprez pour les machines de petite puissance est décrit dans les traités spéciaux et utilisé dans les ateliers. Bornons-nous à dire que l'analyse judicieuse des principes a permis d'obtenir, à poids égal, de la petite machine, un travail vingt fois plus grand que celui des moteurs antérieurement connus. Le travail dépensé s'accroît aussi, bien entendu, mais dans une proportion beaucoup moindre.

Dans cette liste si rapide, qui, moins incomplète, ressemblerait à une table des matières, comment ne pas citer encore la solution de ce problème : une roue tournant suivant une loi quelconque, régulièrement ou irrégulièrement, dans un sens ou dans l'autre, forcer une autre roue, située à distance quelconque, à tourner exactement comme la première, sans pouvoir faire, quelles

que soient la vitesse et la durée de l'épreuve, une seule fraction de tour en plus ou en moins. Puis-je ne pas parler de l'ingénieuse machine qui, pour comparer les intensités de deux courants, les met en un tel rapport avec un anneau de fer doux, que chacun d'eux l'aimante proportionnellement à son intensité ? L'aimantation résultante, accusée par la direction d'une aiguille aimantée, donne le rapport que l'on veut connaître. Un autre appareil mesure l'énergie. L'énergie d'un courant est le produit de l'intensité par la force électromotrice. M. Deprez, au lieu de mesurer chaque facteur, trouve moyen, par une seule observation et à l'aide d'un seul instrument, de représenter le produit cherché, par un poids que donne la machine et qui lui est proportionnel.

D'importantes améliorations sont apportées, enfin, aux machines motrices, dont l'étude depuis plusieurs années a été sa préoccupation de tous les instants. Je n'oserais ni choisir ni tout dire ; à l'inventeur seul appartient de fixer son jour et son heure, et quoique M. Deprez ait pour habitude de ne rien cacher, je me bornerai à dire, pour terminer cette liste qu'il eût été facile de faire plus longue, qu'une disposition des plus simples permet, par la rotation d'une clé, de régler la puissance d'une machine dynamoélectrique, de renverser même instantanément le sens de son action, de le conduire enfin et de le maîtriser comme on a fait pour la machine à vapeur.

VII. — J'ai comparé M. Marcel Deprez à Léon Foucault ; il pourrait rappeler plus encore peut-être, avec des qualités plus éminentes, la figure admirable, mais trop peu connue du grand constructeur G. Froment. Gustave Froment était entré à l'Ecole polytechnique en 1835, son rang était médiocre, mais ses camarades l'avaient, très sérieusement, surnommé l'Homme de génie. Quinze ans après, Léon Foucault écrivait : « Pour qui n'a plus à redouter que des difficultés d'exécution, fallût-il demander des prodiges, M.

Froment est là, dont le talent n'est jamais resté en défaut devant un problème nettement posé ». Les difficultés d'exécution n'absorbaient pas Froment tout entier, ses camarades avaient raison, et Foucault, en louant avec une juste reconnaissance la merveilleuse habileté de l'artiste, aurait pu rappeler l'étendue de son esprit et la solidité de son savoir. Gustave Fromont vivait dans ses ateliers ; c'est là qu'il dépensait en secret son génie. Un moteur électrique, dès l'année 1844, conduisait les machines à diviser et mérite une place d'honneur dans l'histoire de l'électricité. Heureux au milieu de ses machines, fier peut-être, de voir des savants illustres solliciter son concours, Froment ne voulut être qu'un constructeur hors ligne. Il ne publiait rien, ne communiquait rien aux académies, ne leur demandant ni une récompense, ni l'honneur de pénétrer dans leurs rangs. Il ne se plaignait pas qu'on ignorât son mérite et ses contemporains sont excusables de l'avoir laissé dans la demi-obscurité et dans la solitude qui lui plaisaient.

M. Marcel Deprez, bien différent en cela de Froment, communique toutes ses idées, expose au grand jour tous ses résultats et s'efforce d'être utile à tous ; il admet quiconque le demande à contrôler ses assertions et désire avant tout qu'on en pèse le mérite.

Il y aurait injustice à le refuser.

Signé : Joseph BERTRAND.

Comptes rendus des expériences officielles de transmission d'énergie électrique effectuées par Marcel Deprez

I. Expérience entre Miesbach et Munich. — Voici la reproduction du certificat adressé à Marcel Deprez et celle de la lettre qui l'accompagnait d'après La Lumière électrique, 3 février 1883, t. VIII, p. 129-132.

Certificat délivré à M. Marcel Deprez,
par le Comité électrotechnique de Munich.

A l'aide de deux machines dynamoélectriques (système Gramme) d'égale construction, M. Marcel Deprez a transporté à Munich, à une distance de 57 km, à travers un fil télégraphique en fer de 4,5 mm de diamètre, le travail fourni à Miesbach par une machine à vapeur. La machine réceptrice placée dans le Palais de Cristal a mis en mouvement pendant huit jours une pompe centrifuge alimentant une cascade d'environ 2,5 m de hauteur.

Les machines dynamoélectriques ont été mises en mouvement pour la première fois le 25 septembre à 7 heures du soir, et d'après les données de M. l'ingénieur Datterer, désigné par le Comité, la réceptrice placée à Munich tournait à la vitesse de 1500 t : mn ; le frein servant à mesurer le travail était chargé de 1,5 kg.

Une série d'accidents dus à ce fait que les machines étaient construites pour des expériences de laboratoire et

non pour l'usage pratique, arrêtaient au bout de huit jours la marche jusque-là complètement satisfaisante des machines. Les cercles qui entouraient l'anneau d'une des machines se rompirent ; par suite, les fils de l'anneau, de 0,4 mm de diamètre, furent endommagés et durent être isolés de nouveau. Dans le bourg lointain de Miesbach ces réparations ne purent être faites qu'avec de grandes difficultés et exigèrent de la part des collaborateurs de M. Marcel Deprez beaucoup de patience et de persévérance.

Les 9 et 10 octobre, lorsque la commission d'essai commença ses mesures, on ne put atteindre à Miesbach, avec la machine réparée, qu'une vitesse de 1600 t : mn ; les résultats obtenus furent par suite beaucoup moins favorables qu'ils ne l'eussent été à la vitesse normale de 2000 t : mn atteinte tout d'abord.

Pendant quelques instants seulement, on put atteindre, pendant les mesures, la vitesse de 2000 t : mn et encore au commencement des expériences un des balais de la machine se détacha, ce qui produisit un extra-courant et détruisit complètement la machine.

Les résultats obtenus, dans ces circonstances défavorables, sous la direction de MM. les professeurs Dorn, Kittler, Pfeiffer et Schroter ont été les suivants :

Résistance de la ligne, en ohms.....	950,2
Résistance de la machine à Miesbach, en ohms.....	453,1
Résistance de la machine à Munich, en ohms.....	453,4

10 octobre, 12 h 32 mn à 37 mn :	
Nombre de tours par minute, à Miesbach.....	1 611
Nombre de tours par minute, à Munich.....	752
Intensité, en ampères, à Miesbach, $I =$	0,519
Différence de potentiel, en volts, à Munich, $E_2 =$	850

De là on tire	
Différence de potentiel, en volts, à Miesbach, $E_1 = E_2 + 950 I =$	1 343
Travail électrique extérieur, $E_1 I = 697$, soit, en chevaux.....	0,947
Travail électrique total, $E_1 I + I^2 \times 453,1 = 819$, soit, en chevaux.....	1,113
Travail d'échauffement dans tout le circuit, $I^2 \times 1 856,7 = 500$, soit, en chevaux.....	0,680
Travail disponible pour le transport de la force, $E_2 I - I^2 \times 453,4 = 319$, soit, en chevaux.....	0,433
et en centièmes du travail électrique total.....	38,9

Les déterminations électriques du travail entreprises en même temps que les mesures électriques n'ont donné aucun résultat exact ; d'abord la machine de Munich n'avait pas une base assez solide et une partie du travail était absorbée par les vibrations de la machine ; ensuite le dynamomètre V. Hefner-Altenneck, employé à Miesbach, était construit pour mesurer des forces de 15 ch, et les limites d'erreur de cet appareil étaient trop grandes pour la petite force à mesurer. Le travail obtenu à Munich au frein s'est élevé à 0,25 ch ; il faudrait y ajouter le travail absorbé par les vibrations de la machine ; au lieu de se servir de mesures directes, on aurait une évaluation plus exacte du travail dépensé à Miesbach en partant du travail électrique dépensé à Miesbach et du rendement de la machine de Munich, identique à celle de Miesbach, rendement que l'on peut estimer par les chiffres donnés ci-dessus, en tenant compte des trépidations.

Comme par suite des nombreux accidents indiqués plus haut, les résultats obtenus pendant les mesures de la Commission d'Essai sont notablement moins favorables que pendant les premières expériences, M. Marcel Deprez s'est décidé à répéter l'expérience à Munich avec des machines plus solidement construites et nous croyons qu'alors seulement, on pourra prononcer un jugement décisif sur le rendement. Nous n'hésitons cependant pas à proclamer la réussite du transport de la force de Miesbach à Munich, transport en tout cas important dans l'histoire de l'électrotechnique.

La Commission d'Essai pour les
Expériences électrotechniques du
Palais de Cristal de Munich.

Le secrétaire :
Ose. V. MILLER.

Le président :
Dr V. BEETZ.

A Monsieur Marcel Deprez, Paris,

Munich, 11 janvier 1883.

Très honoré Monsieur,

Comme vous avez eu l'extrême bonté de laisser espérer aux membres du Comité soussignés la continuation de vos expériences de transport électrique de force entre Miesbach et Munich, nous ne voulons pas négliger de vous faire savoir que le Comité d'Expériences électrotechniques s'est dissous, mais que cependant des essais électrotechniques seront encore exécutés par le Comité soussigné de l'Union polytechnique.

L'Union polytechnique pense qu'elle ne peut mieux inaugurer la mission qu'elle a acceptée, que par l'expérience grandiose que vous avez en vue, et que de tous côtés la population attend avec une grande anxiété. Aussi se permet-elle de vous prier respectueusement de vouloir bien lui confirmer les assurances données au Comité d'Expériences électrotechniques et de venir répéter ici, en grand, votre expérience si importante au point de vue de l'histoire de l'électrotechnique, et qui a déjà donné une valeur historique à la ligne de Miesbach à Munich.

Nous croyons pouvoir vous assurer que vous trouverez l'appui le plus puissant auprès des Administrations de l'Etat et de la Ville, auprès du consortium fondé à Munich pour l'encouragement des entreprises électrotechniques,

auprès de l'Union polytechnique, et enfin auprès des professeurs et des industriels de notre ville. Nous espérons donc recevoir bientôt de vous une réponse favorable.

Le Comité d'Expériences électrotechniques au Palais de Cristal de Munich.

Le président :
Dr. V. BEETZ.

Le vice-président :
Friedrich HAENLE.

Sur la figure 1 est représentée l'installation à Munich ; un monument a été élevé en grandeur naturelle, dans le Deutsches Muséum, à Munich, qui rappelle cet événement ; la figure 2 représente une vue de ce monument d'après une photographie qui nous a été communiquée par la Direction du Deutsches Museum.

II. Expériences aux ateliers de la Compagnie du Chemin de fer du Nord. — Ces expériences sont relatées dans La Lumière électrique, 10, 17 et 24 février 1883, t. VIII, p. 161-164, 198-199 et 227-229. Il s'agissait, comme dit Cornelius Herz dans le premier de ces trois articles, de clore la discussion soulevée par l'expérience de Marcel Deprez à Munich. Dans ce but, Marcel Deprez obtint du Ministre des Postes et des Télégraphes, l'autorisation de se servir d'une ligne télégraphique. « Il attend encore la réponse, écrit Cornelius Herz, mais sans impatience, grâce à l'obligeance des ingénieurs de la Compagnie du Chemin de fer du Nord » qui ont aidé Marcel Deprez « avec la courtoisie et la complaisance qui sont de tradition parmi

eux, toutes les fois qu'il s'agit d'une expérience intéressant à un degré quelconque la grande industrie des chemins de fer » et qui ont mis à sa disposition la ligne télégraphique, l'emplacement et la force motrice nécessaires. Le 6 février 1883 eut lieu la première expérience officielle (fig. 3).

Les deux machines, génératrice et réceptrice, étaient l'une à côté de l'autre, reliées d'un côté par un fil télégraphique passant au Bourget, d'une résistance de 160 ohms, et de l'autre, par un fil court et de forte section. La résistance totale des induits et inducteurset de la ligne était de 299 ohms. Les deux machines n'étaient pas identiques : la génératrice avait été spécialement étudiée par Marcel Deprez, pouvant développer 14 A sous 2700 v, à 720 t : mn pour une résistance du circuit extérieur de 137 ohms. La réceptrice ne répondait pas aux conditions du rendement optimum ; néanmoins, le rendement « mécanique industriel » atteignit 37 pour 100, pour une puissance de 2 ch. De nouvelles expériences furent reprises le 11 et le 14 février et sont relatées par Marcel Deprez dans les deux derniers articles.

III. Expériences entre Vizille et Grenoble. — Trois rapports ont été publiés dans La Lumière électrique, 15 septembre, 6 octobre et 10 novembre 1883, t. x, p. 65-69, 161-162 et 321-337, sous la signature de J. BOULANGER, président de la commission nommée par le maire de Grenoble qui avait demandé à Marcel Deprez de reprendre ses expériences à Grenoble même. La machine génératrice était installée à Vizille, près de la gare et la machine réceptrice, à Grenoble, soit à une distance de 14 km. Les expériences commencèrent le 22 août 1883 et furent suivies par la commission mentionnée ci-dessus, laquelle établit des rapports détaillés des résultats relevés avec d'utiles commentaires. Les mesures effectuées étaient, d'une part, des mesures dynamométriques et, d'autre part, des mesures électriques. Ces expériences montrèrent la

possibilité de transmettre, avec une ligne d'une résistance de 167 ohms, une puissance de 7 ch (travail mécanique du moteur) avec un rendement de 62 pour 100, la tension aux bornes de la génératrice atteignant près de 3000 v et le courant ayant une intensité de 2,8 A. L'attention était attirée sur l'isolement de la ligne dont l'importance fut déterminée par l'intensité du courant de fuites : on enregistra le courant au départ et le courant à l'arrivée et des différences de l'ordre de 5 à 6 pour 100 furent observées.

De nouvelles expériences furent entreprises dans le but de vérifier la possibilité de distribuer l'énergie électrique pour la force motrice, ce qui n'avait été réalisé qu'à l'Exposition internationale d'Electricité de Paris, en 1881, par Marcel Deprez dont l'installation comportait une génératrice et quelques petits moteurs de machines à coudre.

On disposait à Grenoble, comme réceptrices, de trois machines Siemens et de deux machines Gramme type d'atelier (fig. 4). Comme elles étaient toutes à gros fil, la nécessité d'une génératrice également à gros fil fut reconnue, cette génératrice à excitation composée, suivant le principe de Marcel Deprez, était une machine Gramme à galvanoplastie ; elle était installée sous la Halle de Grenoble. Des bornes de la génératrice partaient deux câbles parallèles sur lesquels étaient montées les dérivation pour chacune des cinq réceptrices. Celles-ci furent mises en route successivement les unes après les autres et les mesures relevées montrent que le courant de 9,7 A pour une réceptrice, devient égal à 21,2 A si deux réceptrices fonctionnent, à 31,5 A pour trois, à 57,9 A pour quatre et à 75,2 A pour cinq, la tension aux bornes de la génératrice oscillant entre 38,8 et 39,1 v. Ainsi était démontrée la possibilité de transmettre l'énergie à une grande distance et de la distribuer... mais déjà était signalé dans le rapport de la commission établi par J. Boulanger,

président de la commission, l'inconvénient des variations de la différence de potentiel sur la ligne qui ne permettraient pas de rendre les récepteurs indépendants les uns des autres, « inconvénients, ajoute le rapporteur, qui existent toutefois pour tout autre transport de travail : eau, gaz, etc ».

IV. Expériences entre Creil et Paris. — Les premières expériences eurent lieu « en boucle », c'est-à-dire les deux machines, la génératrice et la réceptrice, étant à côté l'une de l'autre, à Creil, en circuit sur les deux fils de 56 km reliés à Paris ; ceci, par raison de commodité pour les mesures. Voici d'ailleurs, à propos de ces expériences, le compte rendu qu'en donna Marcel Deprez à l'Académie des Sciences le 26 octobre 1885.

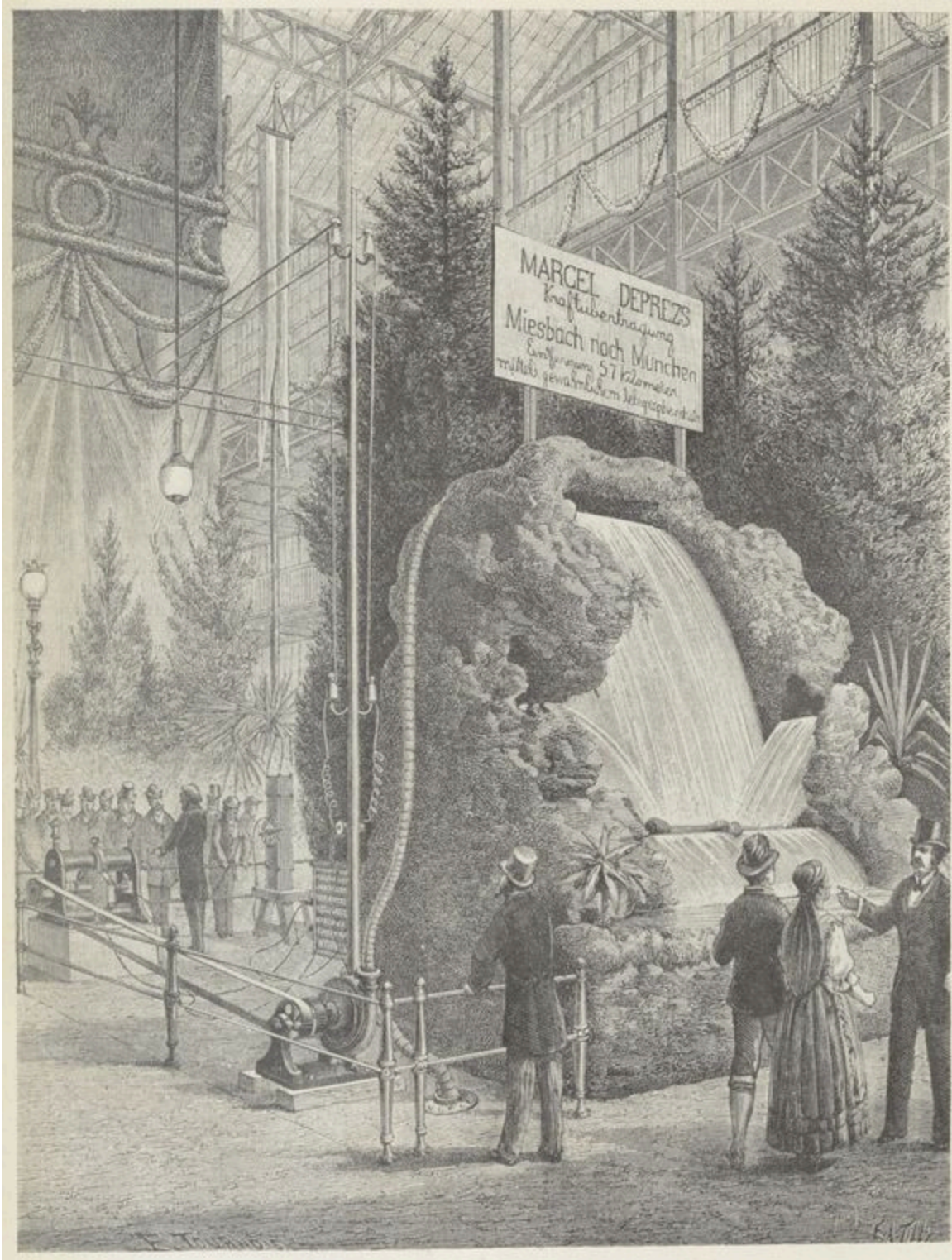
TABLEAU I. — Tableau d'expériences.

	PREMIÈRE EXPÉRIENCE		DEUXIÈME EXPÉRIENCE	
	généralrice	réceptrice	généralrice	réceptrice
Vitesse, en tours par minute...	190	248	170	277
Force électromotrice (directe ou inverse), en volts.....	5 469	4 242	5 717	4 441
Intensité du courant, en ampères.....	7,21	7,21	7,20	7,20
Travail dans le champ magnétique, en chevaux.....	9,2	3,75	10,30	3,80
Travail électrique dans l'induit, en chevaux.....	53,59	41,44	55,90	43,4
Travail mécanique mesuré au dynamomètre ou au frein, en chevaux.....	62,10	35,80	61	40
Rendement électrique.....	77 pour 100		78 pour 100	
Rendement mécanique.....	47,7 pour 100		53,4 pour 100	

« Je suis heureux d'annoncer à l'Académie que les premières expériences de transmission de la force par

l'électricité entre Paris et Creil viennent d'avoir lieu et que les résultats ont été très satisfaisants.

Fig. I. — Vue de l'installation de Marcel Deprez au Palais de Cristal, à Munich (1882), représentant la de l'énergie électrique transmise de Miesbach, à une distance de 57 kilomètres. (Vue extraite de « La Lumière électrique ».)



» La longueur de la ligne télégraphique qui relie les deux stations est de 56 km ; mais comme le retour du courant n'a pas lieu par la terre, il est obligé de parcourir en réalité une longueur de 112 km d'un câble en cuivre, équivalant, comme section, à un conducteur unique de 5 mm de diamètre. La résistance électrique totale de ce câble est de 100 ohms à la température de 15°C.

» La machine génératrice est située à Creil. Elle a deux anneaux tournant dans deux champs magnétiques distincts, constitués chacun par huit électroaimants. Chaque anneau a une résistance de 16,5 ohms et un diamètre extérieur de 0,78 m. Le courant engendré par cette machine sera utilisé à la Chapelle par deux machines réceptrices, situées à quelques centaines de mètres l'une de l'autre. Une seule des réceptrices, est actuellement terminée. Elle possède, comme la génératrice, deux anneaux ; ils ont 0,58 m de diamètre extérieur et une résistance électrique de 18 ohms chacun.

Fig. 2. — Vue du monument élevé au Deutsches Muséum, à Munich, en vue de commémorer les essais, par Marcel Deprez, de transmission d'énergie, en 1882. (D'après une photographie de la Direction du Deutsches Muséum, à Munich.)



» Les expériences, commencées depuis le 17 octobre dernier, ont eu lieu en boucle, c'est-à-dire que les machines génératrice et réceptrice sont à côté l'une de l'autre, ainsi que cela a eu lieu d'ailleurs dans les expériences faites au mois de mars 1883, aux ateliers du Chemin de fer du Nord. par une commission nommée par l'Académie. Les objections que certaines personnes ont faites à ce procédé

d'expérimentation, qui se prête, beaucoup mieux que la marche à distance, aux constatations scientifiques, ont été déclarées sans fondement par Tresca, sous la réserve que l'on prenne, bien entendu, toutes les précautions nécessaires pour mesurer, pendant l'expérience même, la résistance réelle de la ligne, ce qui a toujours été fait.

» Entre la génératrice et la machine à vapeur qui la met en mouvement, est intercalé un dynamomètre très exact, analogue au dynamomètre de White, qui inscrit à chaque instant sur une bande de papier le travail mécanique absorbé par la génératrice. Ce dynamomètre a été étudié par M. Contamin, ingénieur de la Compagnie du Chemin de fer du Nord.

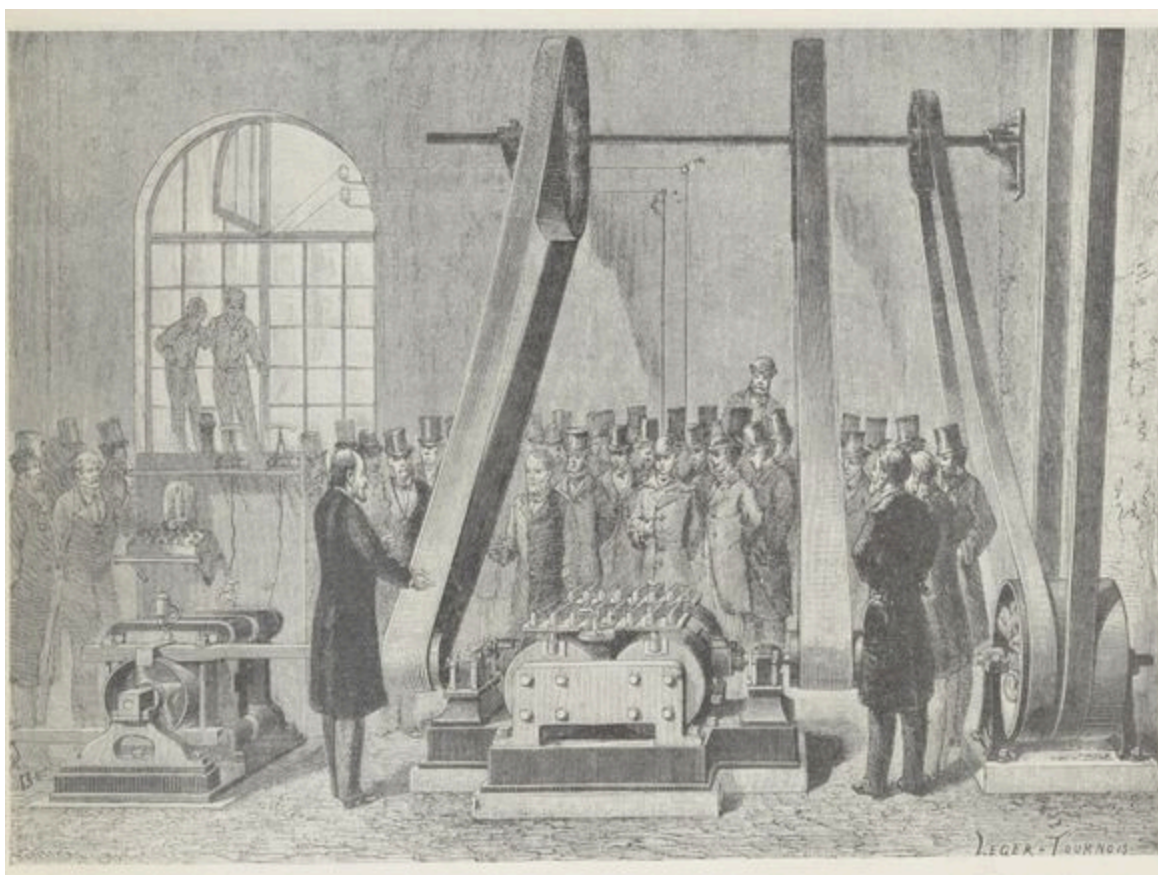
» La réceptrice est munie d'un frein de Prony, dans lequel réchauffement de la poulie de friction est rendu impossible grâce à une circulation d'eau. Ce frein reste en équilibre parfait pendant des heures entières. Des tachymètres Buss font connaître, à chaque instant, la vitesse de la génératrice et de la réceptrice. Ces vitesses restent d'ailleurs constantes pendant toute la durée d'une expérience.

» On a donc tous les éléments nécessaires pour déterminer le travail mécanique absorbé par la génératrice, ainsi que celui qui est restitué par la réceptrice.

» Quant aux mesures électriques, elles sont prises à l'aide de trois galvanomètres, parfaitement gradués, et qui font connaître la différence de potentiel aux balais de la génératrice, la différence de potentiel aux balais de la réceptrice, et l'intensité du courant qui traverse les deux machines et la ligne. Enfin deux autres galvanomètres permettent de mesurer l'intensité des courants engendrés par les petites machines excitatrices, servant à produire les champs magnétiques de la génératrice et de la réceptrice. Les indications de ces divers instruments sont d'une grande exactitude.

» Je donnerai, dans une prochaine communication, des tableaux très complets, contenant toutes les données électriques et mécaniques des expériences faites, soit par la Commission d'Expériences présidée par M. l'ingénieur en chef des Ponts et Chaussées Collignon, soit par moi. Je me contenterai, quant à présent, de faire connaître les résultats d'une des expériences de la Commission, et d'une autre expérience faite deux jours après devant M. Sartiaux, sous-chef de l'Exploitation du Chemin de fer du Nord et ingénieur délégué de la Commission d'Expériences (tableau I).

Fig. 3. — Vue de l'installation de Marcel Deprez pour ses expériences dans les ateliers de la Compagnie du Chemin de fer du Nord (1883). (Vue extraite de « La Lumière électrique ».)



» On voit, et c'est sur ce point que je désire attirer l'attention, qu'un travail utile de 40 ch a été développé par

la réceptrice avec un rendement industriel de 50 pour 100, la vitesse de la génératrice étant de 17° t : mn seulement et celle de la réceptrice, de 177 t : mn. La force électromotrice de la génératrice était de 5700 v environ. Dans d'autres expériences, on a dépassé 6000 v. Ces machines développent donc des forces électromotrices considérables, avec de très faibles vitesses angulaires. On remarquera également que la réceptrice, bien que n'ayant que des anneaux de 0,50 m de diamètre et n'étant parcourue que par un courant de 7 A, a développé un travail mécanique utile de (648 kg-m par tour, sans aucun échauffement appréciable. Ce sont là des conditions qui n'ont jamais été réalisées jusqu'ici.

» Je ne puis terminer cette note sans citer les personnes grâce au concours desquelles des expériences aussi coûteuses ont été rendues possibles ; d'abord, et dans l'ordre chronologique, M. le docteur Herz, directeur du journal « La Lumière électrique ». qui, pendant deux ans. a défendu avec la plus grande énergie, par tous les moyens en son pouvoir, la cause de la transmission électrique de la force à grande distance, et grâce auquel j'ai pu faire les expériences de Munich, du Chemin de fer du Nord et de Grenoble.

« Les expériences actuelles, dont je viens d'apporter les premiers résultats devant l'Académie, ont été faites avec l'appui et le concours de MM. de Rothschild. Je suis heureux de pouvoir leur en témoigner publiquement ma reconnaissance ».

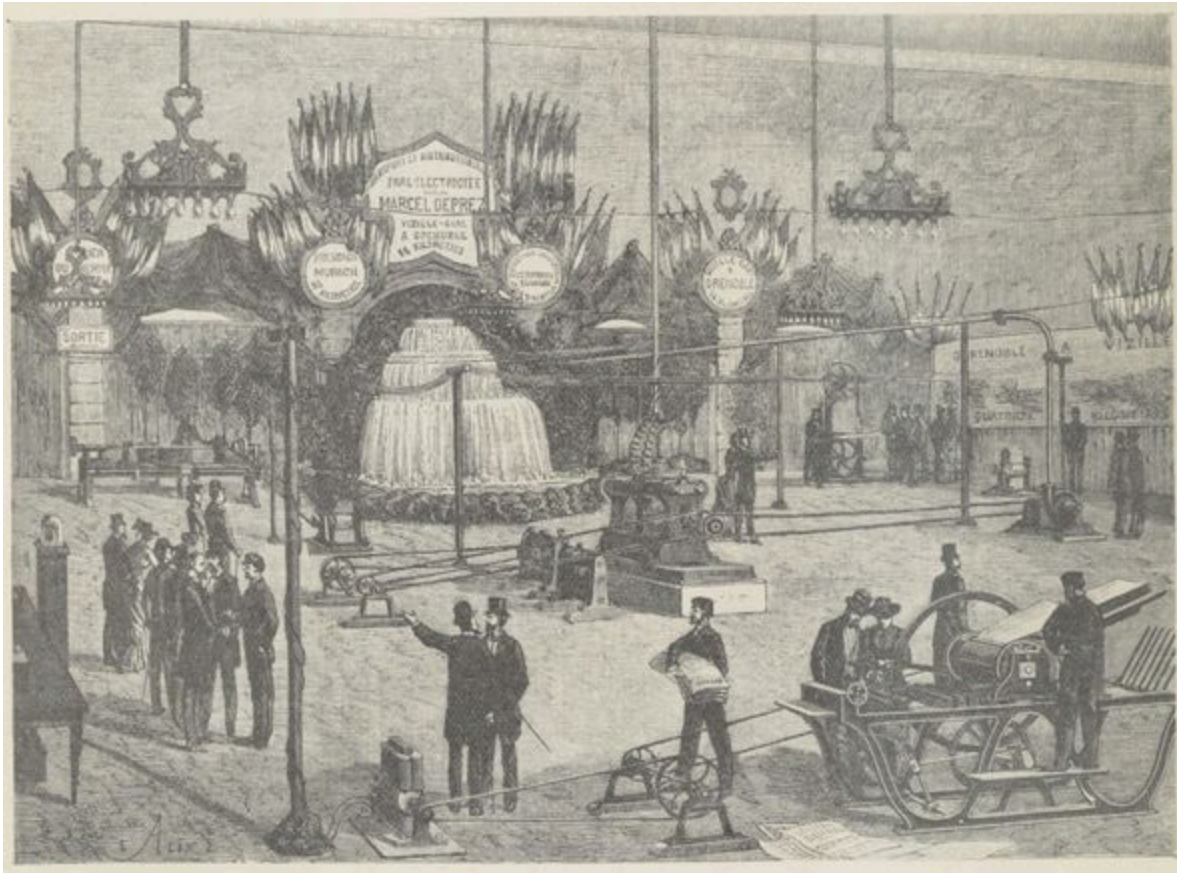
Il s'agit donc là des expériences « en boucle » ; celles en « ligne réelle » ne tardèrent pas à être entreprises et revêtirent un caractère officiel avant la fin de l'année 1885, puisque dans la séance solennelle du 20 décembre 1885, de l'Académie des Sciences, l'amiral Jurien de la Gravière y faisait allusion dans les termes reproduits à la page 856 de ce numéro.

Elles se poursuivirent de longs mois, Marcel Deprez s'efforçant de mettre au point les différents organes de l'installation et de remédier à toutes les causes d'insuccès observées au cours des premiers essais. Le 24 mai 1886 la sous-commission désignée par l'Académie des Sciences ⁴ procéda aux expériences, en quelque sorte officielles, dans les conditions que relate Maurice Lévy dans son rapport du 2 août 1886. Voici, d'après ce rapport, quels furent les conditions et les principaux résultats de ces essais :

La force motrice à Creil devait être fournie par deux machines locomotives (fig. 5) de 200 ch ; une seule de ces deux machines ayant été construite, on ne put recevoir à Paris que 50 ch en en prenant 100 à Creil.

La génératrice installée à Creil était une machine Gramme comportant deux induits en anneau constitués chacun par des rondelles en tôle mince isolées les unes des autres au moyen de papier paraffiné. L'ensemble de ces tôles était serré par des boulons entourés d'un tube en caoutchouc durci, précaution reconnue nécessaire à la suite d'incidents antérieurs.

Fig. 4. — Vue de l'installation de la distribution de l'énergie à Grenoble (1883). (Vue extraite de « La Lumière électrique »).



Les bobines des induits furent fabriquées sous forme de secteurs occupant chacun un septième de la circonférence de l'induit et enroulées par couches d'un fil continu de telle sorte que les fils voisins ne présentent entre eux que de faibles différences de potentiel. Ces bobines étaient enfilées dans chacune des deux pièces en forme de secteur constituant chacun des deux induits. Une telle disposition offrait de nombreux avantages, notamment celui de permettre le remplacement sans difficulté d'une bobine en cas de brûlure d'un fil de cette dernière.

L'élévation de la température du circuit induit, mesurée par variation de résistance, ne dépassait pas 47°C après neuf heures de fonctionnement en régime continu.

Les inducteurs de la génératrice étaient constitués par huit électroaimants en fer à cheval disposés dans des plans perpendiculaires passant par l'axe des deux induits.

La réceptrice installée à la Chapelle ne différait de la génératrice de Creil que par ses proportions moindres et en ce que les anneaux de l'induit étaient formés de fils de fer et non de tôle.

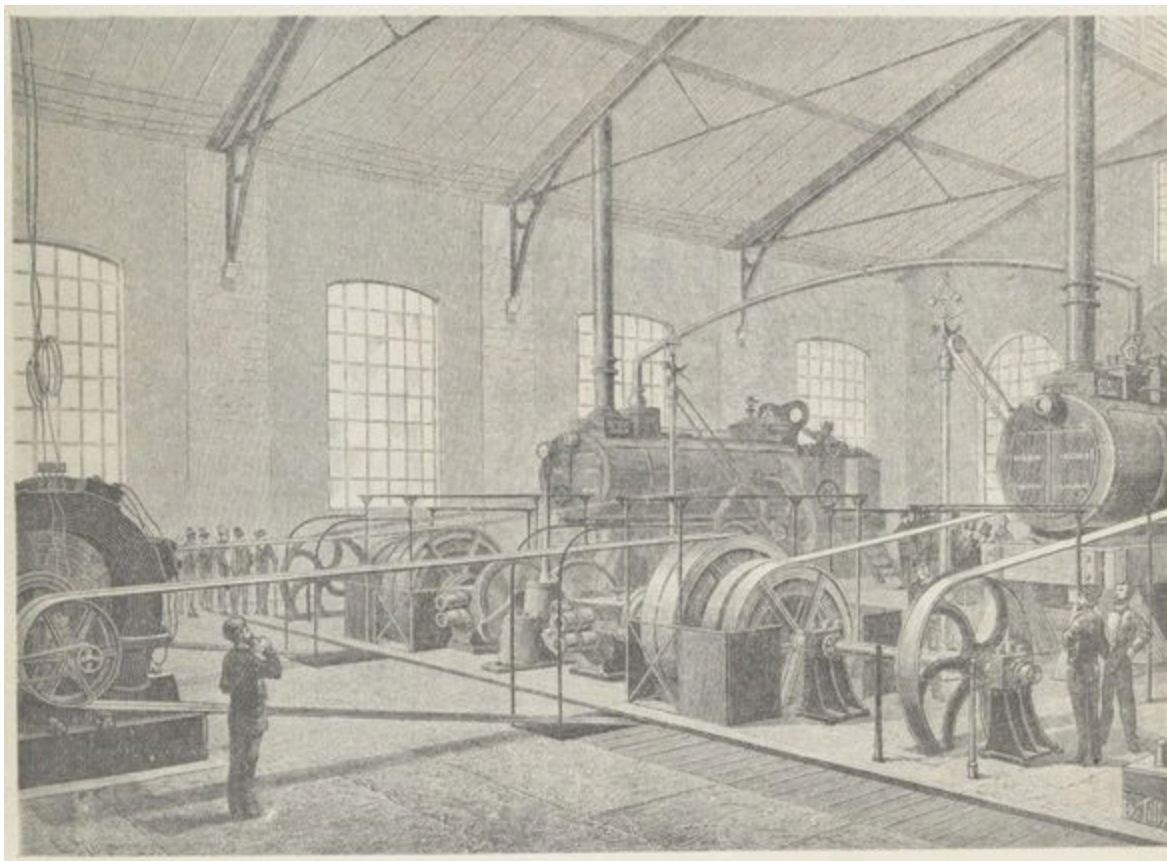
L'installation comportait donc trois circuits distincts : un circuit local à Creil formé par l'excitatrice, à excitation série, et les inducteurs de la génératrice ; un circuit local à la Chapelle, formé de même par l'excitatrice, à excitation compound, et les inducteurs de la réceptrice ; un circuit général de jonction dans lequel entrent la ligne et les anneaux des deux machines génératrice et réceptrice.

Le démarrage de la réceptrice de la Chapelle s'effectuait de la manière suivante : à l'aide d'un commutateur spécial, on plaçait temporairement le circuit d'excitation de la réceptrice dans le circuit de la ligne ; cette machine, qui actionnait également sa propre excitatrice, démarrait ainsi en moteur série. Quand le courant d'excitation avait atteint sa valeur normale, on séparait, au moyen du même commutateur, le circuit d'excitation de la réceptrice de celui de la ligne et on le branchait aux bornes de l'excitatrice. Ce commutateur effectuait graduellement ces opérations et de telle façon que soit évité tout échauffement anormal des inducteurs. A cet effet, ces derniers étaient divisés en galettes qui se trouvaient montées en série lors de leur introduction dans le circuit de ligne et, toujours par le jeu du commutateur, réintroduites, montées en parallèle, dans le circuit de l'excitatrice.

L'énergie reçue à Paris pouvait être utilisée pour l'entraînement des pompes des accumulateurs de la Chapelle, le supplément pouvant être distribué entre divers appareils. savoir : un marteau-pilon électrique ; un tour ; un treuil électrique entraînant une grue roulante ; un frein électrique de locomotive. L'alimentation de ces appareils

était assurée par une génératrice Gramme entraînée par la réceptrice.

Fig. 5. — Vue de la salle des machines de la station génératrice de Creil (1885). (Vue extraite de « La Lumière électrique ».)



En ce qui concerne les résultats, la puissance consommée à Creil a varié de 67 à 116 ch et celle recueillie à Paris, de 27 à 52 ch, d'où une variation du rendement de 41 à 45 pour 100. « C'est, ajoute Maurice Lévy, l'expérience la plus importante, celle dans laquelle on a pris 116 ch à Creil pour en recevoir 52 à Paris qui a donné le rendement le plus grand, celui de 45 pour 100. Le fait, continue Maurice Lévy, qu'on peut transporter industriellement 116 ch de force brute à 56 km de distance en en tirant un rendement industriel strictement mesuré de 45 pour 100 et en ne dépassant pas une vitesse de 218 tours à la génératrice, et cela avec continuité, sans fatiguer les machines, constitue

un résultat extrêmement remarquable, auquel il était difficile de s'attendre et qu'il convient de signaler hautement ». Des résultats relevés au cours de ces expériences, Maurice Lévy déduit la répartition de l'énergie perdue entre les différents organes de l'installation et qui est la suivante, pour une puissance absorbée par la génératrice de 116 ch :

Dans la génératrice.....	32,2 ch
Dans la réceptrice.....	19,1 ch
Dans la ligne.....	12,7 ch
Puissance totale perdue.....	64,0 ch

La force électromotrice maximum a atteint 6 290 v et l'intensité du courant, 10 A.

Bibliographie des travaux et expériences de Marcel Deprez jusqu'à la fin de 1885

La bibliographie qui suit des travaux et expériences de Marcel Deprez comprend d'abord la liste chronologique des notes, communications et articles publiés sous sa signature jusqu'à la fin de 1885, dans les « Comptes rendus de l'Académie des Sciences » et dans « La Lumière électrique » ⁵. Marcel Deprez fit également connaître les résultats de ses travaux, notamment ceux qui concernent les mécanismes, dans des communications à la Société des Ingénieurs civils de France, à la Société française de Physique et en différents Congrès de l'Association française pour l'Avancement des Sciences entre 1874 et 1878 ; un certain nombre de brevets furent aussi déposés par lui qui, d'ailleurs, pour la plupart, sont décrits dans l'une ou l'autre des publications indiquées ci-dessus.

Cette publication serait incomplète et ne permettrait pas de se rendre compte des difficultés rencontrées par Marcel Deprez pour faire triompher ses conceptions sur la transmission et la distribution de l'énergie électrique, conceptions qui, aujourd'hui, sont à la base de l'électrotechnique, au moins en ce qui concerne le courant continu, si elle n'était accompagnée de l'indication des principales études publiées par d'autres, à l'époque, sur les travaux de Marcel Deprez. Ces études critiques, favorables ou non, fixent les idées sur les propositions discutées au début de ce que l'on peut appeler « l'ère de l'électrotechnique ».

Une table analytique des matières permet de retrouver la liste des documents relatifs à chacune des principales

questions étudiées par Marcel Deprez. — A. C.

I. Liste chronologique des travaux de Marcel Deprez. —
1. Sur les appareils de distribution à un seul tiroir. C. R. Ac. des Sc., 8 juillet 1867, t. LXV, p. 68-70. — Résumé d'un mémoire où est développée la théorie d'un appareil dans lequel sont supprimés les excentriques des anciens dispositifs. Marcel Deprez substitue aux excentriques un système à parallélogramme articulé.

2. Note sur une distribution sans excentrique à parallélogramme et à coulisse droite. Mémoires et Comptes rendus des Travaux de la Société des Ingénieurs civils de France, 1868, p. 459-463.

3. Note sur les appareils de distribution à deux tiroirs des machines à vapeur. C. R. Ac. des Sc., 8 mars 1869, t. LXVIII, p. 600-602. — Enoncé et démonstration d'un théorème qui facilite la détermination des éléments des excentriques de détente des machines à vapeur.

4. Nouvel indicateur dynamométrique, faisant connaître toutes les circonstances du travail de la vapeur dans le cylindre d'une machine. C. R. Ac. des Sc., II septembre 1871, t. LXXIII, p. 654-656. — Modification de l'indicateur de Watt permettant son utilisation pour des vitesses supérieures à 60 à 70 t : mn ; faible inertie des pièces mobiles.

5. Instrument servant à calculer mécaniquement la valeur des aires, des centres de gravité et des moments d'inertie des figures planes. C. R. Ac. des Sc., 25 septembre 1871, t. LXXIII, p. 785-787.

6 Etudes sur les chronographes électriques et recherches sur l'étincelle d'induction et les électroaimants. C. R. Ac.

des Sc., 18 mai 1874, t. LXXVIII, p. 1427-1430. — L'appareil décrit est un chronographe Schultz où est utilisé le mouvement d'un diapason entretenu par le procédé Mercadier ; l'enregistrement des instants successifs du phénomène se fait au moyen d'une étincelle produite par rupture d'un circuit, suivant la solution proposée par Martin de Brettes. Marcel Deprez a déterminé le retard de l'étincelle, c'est-à-dire « l'intervalle de temps entre la rupture du courant inducteur et l'explosion de l'étincelle », retard trouvé de l'ordre de 0,0001 s. La difficulté de l'emploi de l'étincelle résulte de sa production très capricieuse. Marcel Deprez a préféré recourir à des électroaimants.

7. Perfectionnement aux chronographes électriques et recherches sur les électroaimants. C. R. Ac. des Sc., 1^{er} juin 1874, t. LXXVIII, p. 1563-1565. — Marcel Deprez propose l'emploi d'électroaimants pour l'enregistrement des instants successifs des phénomènes et montre que c'est le fonctionnement par déclenchement qu'il faut utiliser. Il calcule la vitesse de l'armature après la rupture du courant et compare le résultat théorique au résultat expérimental : l'écart observé est attribué au retard de la désaimantation. Cet appareil dénommé à « déclenchement par frottement » a été appliqué à la mesure de la pression de la poudre dans les bouches à feu.

8. Recherches sur l'étincelle d'induction et les électroaimants. Comptes rendus des Séances de la Société française de Physique, 26 juin 1874, p. 93-96.

9. Sur de nouveaux appareils dits « accéléromètres » destinés à étudier les phénomènes de combustion des poudres. C. R. Ac. des Sc., 29 juin 1874, t. LXXVIII, p. 1855-1888. — Description d'un appareil très simple : piston dont

la course est limitée et réglée et qui porte une masse libre ; celle-ci, à l'arrêt du piston, poursuit sa course à la vitesse qu'avait atteinte le piston avant l'arrêt. On en déduit la pression de la poudre qui a provoqué le mouvement du piston. (Cette note a été présentée en commun avec II. Sebert.)

10. Sur de nouveaux appareils destinés à étudier les phénomènes de combustion des poudres. C. R. Ac. des Sc., 2 novembre 1874, t LXXIX, p. 980-984. — Description d'un appareil différant un peu de celui qui a fait l'objet de la note du 29 juin 1874 (9). Cet appareil dit « accélérographe » permet d'enregistrer la courbe des accélérations imprimées à une masse soumise à l'action des gaz. (Cette note a été présentée en commun avec H. Sebert.)

11. Recherche sur la vitesse d'aimantation et de désaimantation du fer, de la fonte et de l'acier. C. H. Ac. des Sc., 31 mai 1875, t. LXXX, p. 1353-1354. — Ces recherches portent sur l'influence de la nature du fer (fer, fonte ou acier) d'un électroaimant sur la durée des phases d'aimantation et de désaimantation.

12. Foyers caloriques du docteur Paquelin. Comptes rendus des Séances de la Société française de Physique, 15 mars 1878, p. 44-47.

13. Appareils servant à relever à distance les courbes représentatives du travail de la vapeur dans les cylindres des machines locomotives. Comptes rendus des Séances de la Société française de Physique, 21 juin 1878, p. 128-131 et Mémoires et Compte rendu des Travaux de la Société des Ingénieurs civils de France, 1878, p. 418-421. — Description des appareils prévus sur le wagon dynamomètre de la Compagnie des Chemins de fer de l'Est

pour l'enregistrement des diagrammes relatifs au fonctionnement de la locomotive.

14. Nouveau régulateur de vitesse. Comptes rendus des Séances de la Société française de Physique, 16 août 1878, p. 165-168.

15. Une machine magnétoélectrique donnant un courant continu ne peut exister sans contact glissant. Comptes rendus des Séances de la Société française de Physique, 17 janvier 1879, p. 18-19.

16. Indicateur électrique des pressions. Comptes rendus des Séances de la Société française de Physique, 17 janvier 1879, p. 20-27.

17. Machine magnétoélectrique. Comptes rendus des Séances de la Société française de Physique, 4 avril 1879, P. 92-94.

18. Sur le rendement économique des moteurs électriques et sur la mesure de la quantité d'énergie qui traverse un circuit électrique. C. R. Ac. des Sc., 15 mars 1880, t. xc, p. 590-593 et Comptes rendus des Séances de la Société française de Physique, 5 mars 1880, p. 35-39. — Le rendement ne dépend que de la force électromotrice « directe » de la machine génératrice et de la force électromotrice « inverse » de la machine réceptrice, mais non de la résistance du circuit extérieur ⁶. Dans cette note est également posé le principe de la mesure de la puissance avec un ampèremètre (rhéomètre à gros fil) et un voltmètre (rhéomètre à fil fin).

19. Synchronisme électrique de deux mouvements quelconques. Comptes rendus des Séances de la Société

française de Physique, 19 mars 1880, p. 35-39.

20. Sur la mesure d'énergie. C. H. Ac. des Sc., 5 avril 1880, t. XC, p. 812-814. — Marcel Deprez décrit le wattmètre, donnant directement la valeur du produit II' . Si l'on ajoute un totalisateur, imaginé par lui en 1876, on obtient le compteur d'énergie.

21. Mesureur d'énergie. L. E., 1^{er} avril et 1^{er} mai 1880, t. II, p. 133 et 170-171. — Cet article complète la note (20) à l'Académie des Sciences où est énoncé le principe du wattmètre ; il contient la description d'une des dispositions imaginées par Marcel Deprez pour la réalisation de cet appareil.

22. Sur un nouvel indicateur dynamométrique. C. R. Ac. des Sc., 12 avril 1880, t. xc, p. 861-863. — Suivant la disposition adoptée dans les indicateurs existants à l'époque, le crayon se meut en ligne droite parallèlement à l'axe du cylindre portant le papier destiné à recevoir le tracé, le cylindre se déplaçant et reproduisant le mouvement du piston de la machine étudiée ; Marcel Deprez imagine un mécanisme dans lequel seul le crayon est mobile et se déplace sur le papier fixe.

23. Synchronisme électrique de deux mouvements quelconques. C. H. Ac. des Sc., 19 avril 1880, t. xc, p. 915-917 et L. E., 15 juin 1880, t. II, p. 238-239. — Ce dispositif comporte un transmetteur et un récepteur. Le transmetteur se compose de quatre contacts fixes reposant sur un tambour formant commutateur et assurant dans son mouvement de rotation l'inversion du sens du courant dans le circuit où est inséré l'appareil. Ce circuit alimenté par une pile aboutit au récepteur constitué par deux bobines Siemens, montées sur un même axe à l'intérieur d'un

aimant permanent en fer à cheval. A chacune des combinaisons possibles des inverseurs correspond une position d'équilibre du système récepteur, et une seule. Cet appareil a été imaginé par Marcel Deprez pour permettre l'enregistrement à distance des diagrammes représentatifs du travail dans les cylindres des locomotives ; ce problème s'était posé pour l'étude de l'équipement du wagon d'expérience de la Compagnie des Chemins de fer de l'Est.

24. Des locomotives électriques. L. E., 15 octobre, 15 novembre et 1^{er} décembre 1880, t. II, p. 410-412, 453-454 et 473 — Ayant établi que la vitesse d'une locomotive est proportionnelle au quotient de la puissance T , elle-même fonction notamment du coefficient de frottement, par le poids P de la locomotive, Marcel Deprez montre la possibilité d'utiliser le moteur électrique pour la traction et calcule, en particulier, la puissance nécessaire pour le transport des dépêches sur tout le réseau souterrain de Paris qui, avec un moteur de 3 ch, serait de 12 ch, en admettant un rendement de l'ensemble de 0,25. Le compte rendu d'essais entrepris par lui fait l'objet de la fin de cette étude.

25. Mesureur de courants. L. E., 15 novembre 1880, t. II, p. 462-463. — A propos d'une description publiée dans « La Lumière électrique » du 1^{er} octobre 1880, t. II, p. 396-397, d'un galvanomètre de torsion de Siemens et Halske, d'après l'« Elektrotechnische Zeitschrift » de juin 1880, Marcel Deprez rappelle l'appareil qu'il a imaginé deux ans auparavant et qui présente de grandes analogies avec celui de Siemens et Halske. A son tour, E. Hospitalier, auteur de la description visée par Marcel Deprez, répond dans « La Lumière électrique » du 1^{er} décembre 1880, t. II, p. 488 ; il poursuit la discussion d'antériorité soulevée par Marcel

Deprez et montre les difficultés que présente l'établissement des priorités.

26. A propos du mesureur de courants. L.E., 15 décembre 1880, t. II, p. 511. — Lettre de Marcel Deprez répondant aux observations de E. Hospitalier relatives à l'antériorité revendiquée (25) en ce qui concerne le galvanomètre.

27. Application de l'électricité à l'étude des phénomènes très rapides. L. E., 5 février. 1881, t. III, p. 104-105 et 13 juillet, 27 et 31 août et 3 septembre 1871, t IV, p. 58-59, 267, 282-283 et 293. — Après avoir étudié l'application de l'étincelle à l'enregistrement de phénomènes très rapides, Marcel Deprez examine la possibilité de l'enregistrement électrochimique, « connu depuis plus de trente ans, et abandonné » ; d'où Marcel Deprez conclut que « l'inscription électrochimique ne jouit pas des avantages qui lui ont été attribués ou qu'ils sont accompagnés d'inconvénients qui les atténuent au point de lui faire préférer les électroaimants ». Il décrit les deux types d'enregistreur électromagnétique qu'il a imaginés en tenant compte du retard à l'aimantation et à la désaimantation du fer.

28. Sur un nouvel interrupteur destiné aux bobines d'induction. Comptes rendus des Séances de la Société française de Physique, 18 février 1881, p. 34-35 ; L. E., 7 mai 1881, t. III, p. 325-326, et C. H. Ac. des Sc., 30 mai 1881, t. XCII, p. 1283-1285. — L'appareil qui fait l'objet de ces communications est étudié pour assurer une rupture et une fermeture plus rapides du circuit de la bobine inductrice que les interrupteurs utilisés jusqu'alors. Marcel Deprez obtient ce résultat avec une lame de fer doux s'aimantant énergiquement à l'une de ses extrémités, l'autre étant sollicitée par un ressort à boudin dont la

tension est réglable. Cette lame constitue le contact mobile, tandis que le contact fixe est une vis platinée.

29. Sur un galvanomètre destiné aux usages industriels. L. E., 30 avril 1881, t. III. p. 309-312. — Description d'un appareil de mesure de l'intensité du courant avec aiguille mobile à « arête de poisson » de construction simple et robuste, imaginé par Marcel Deprez et « construit dans les ateliers de M. Carpentier ». Marcel Deprez fait suivre cette description de quelques indications sur l'étalonnage de ce « rhéomètre ».

30. Théorème sur les systèmes électromagnétiques à armatures aimantées. L. E., 14 mai 1881, t. III, p. 341-342. — Si l'on considère deux systèmes électromagnétiques, composés chacun d'un électroaimant et d'une armature, identiques entre eux, mais l'armature du premier étant en fer doux et celle du second étant aimantée, les efforts d'attraction exercés par les deux électroaimants sont différents : l'effort du second système est plus grand que celui du premier et le rapport de ces deux efforts est d'autant plus grand que le courant est plus faible.

31. Sur un mode de représentation graphique des phénomènes mis en jeu dans les machines dynamoélectriques. C. R. Ac. des Sc., 16 mai 1881, t. XCII, p. 1152-115. — Dans cette note est introduite la notion de courbe « caractéristique » et est exposé le parti que l'on peut tirer de son étude. Marcel Deprez montre, comme première conséquence de la théorie, que la caractéristique d'une machine dynamoélectrique ne peut être une droite : « c'est une ligne qui ne passe pas par l'origine, dont les premières portions ont un très grand rayon de courbure et dont la tangente finit par se rapprocher beaucoup d'une parallèle à l'axe des x ».

32. Indicateur magnétique de vitesse. L. E., 11 juin 1881, t. III, p. 407-408. — Description d'un indicateur de vitesse où est appliquée l'action d'un aimant sur un disque métallique.

33. De l'application de l'électricité à l'étude des phénomènes qui s'accomplissent dans les cylindres des machines à vapeur. L. E., 2 juillet 1881, t. iv, p. 12-14. — Exposé abrégé de l'ensemble des recherches que poursuivait Marcel Deprez depuis près de quinze ans en vue de créer des appareils permettant d'enregistrer le diagramme des pressions successives de la vapeur dans un cylindre de machine à vapeur à mouvement rapide ou des gaz de la poudre dans l'âme d'une bouche à feu.

34. A propos du galvanomètre portatif absolu pour les courants de grande intensité de MM. Ayrton et John Perry. L. E., 2 juillet 1881, t. IV, p. 15. — Lettre de Marcel Deprez à propos de la description publiée dans « La Lumière électrique » du 18 juin 1881, t. III. p. 428-431, d'un galvanomètre où est appliqué un principe déjà utilisé dans le galvanomètre de Marcel Deprez : une aiguille légère et polarisée, dirigée par un aimant permanent puissant. Une réponse de W.-E. Ayrton et John Perry à cette lettre a paru dans le numéro du 3 août 1881 de « La Lumière électrique », t. IV, p. 159). Les auteurs signalent une communication de Sir William Thomson, en 1867, à la British Association où il est fait allusion au principe énoncé ci-dessus à propos des électromètres.

35. Représentation graphique des phénomènes qui s'accomplissent dans les machines dynamoélectriques. L. E., 23 juillet 1881, t. IV, p. 100-102. — Développement de la note (31) présentée à l'Académie des Sciences le 16 mai 1881.

36. La transmission électrique du travail à grande distance. L. E., 10 et 24 août 1881, t. IV, p. 179-180 et 246-248. — Marcel Deprez, reprenant les résultats des expériences de Chatham (La Lumière électrique, 16 avril 1881, t. III, p. 281-283), montre qu'il est possible « avec deux machines identiques du type C de transmettre un travail utile de 10 ch à 50 km de distance au moyen d'un fil télégraphique ordinaire, la force motrice initiale étant d'environ 16 ch ». Le but de cet article est de faire ressortir que le rendement d'une transmission d'énergie électrique est indépendant de la résistance du circuit à la condition que la tension soit d'autant plus élevée que la section du conducteur est plus faible. Marcel Deprez répond ainsi aux objections formulées contre la transmission de l'énergie à distance qui nécessiterait des conducteurs de section d'autant plus grande que la distance serait elle-même plus grande.

37. A propos du galvanomètre portatif absolu pour les courants de grande intensité de MM. Ayrton et John Perry. L. E., 13 août 1881, t. IV, p. 207-208. — Nouvelle lettre de Marcel Deprez qui clôt la discussion soulevée par lui (34) à la suite d'un article de W.-E. Ayrton et John Perry : « Je poserai, écrit Marcel Deprez à Ayrton, la question suivante : Existait-il avant mon galvanomètre un instrument permettant de mesurer les courants intenses ? Si oui, qu'il le fasse connaître ». Aucune réponse ne fut donnée à cette question, du moins par la voie de « La Lumière électrique ».

38. Nouveau galvanomètre astatique de MM. Deprez et d'Arsonval. L. E., 7 septembre 1881, t. IV, p. 309-310. — L'appareil décrit dans cet article, à cadre mobile, est destiné à la mesure précise des courants pour recherches scientifiques. Il s'agit du galvanomètre à cadre mobile, dont le plan et celui de l'aimant en fer à cheval sont

horizontaux ; suivant l'axe horizontal du cadre et à l'intérieur de ce dernier est disposé un noyau de fer doux. Pour que l'appareil ne soit pas complètement astatique, il suffit d'abaisser légèrement le centre de gravité du système mobile au-dessous des arêtes sur lesquelles repose le cadre. Marcel Deprez énonce le principe du shuntage de l'appareil pour en amortir les oscillations.

39. Sur un nouveau galvanomètre et sur les instruments destinés aux mesures électriques. L. E., 14 septembre 1881, t. IV, p. 340-341 et 5 novembre 1881, t. v, p. 188-190. — Dans le nouveau galvanomètre, à aimant mobile, décrit dans cet article, les aimants en fer à cheval sont substitués aux aimants droits ; le cadre est fixe et agit sur deux aimants en fer à cheval, identiques et opposés par leurs pôles de même nom, Cette disposition augmente la sensibilité du système. Le principe des électrodynamomètres pour courant alternatif est énoncé. Deux types de « rhéomètres » sont décrits.

40. Sur la distribution du courant électrique. L. E., 1^{er} octobre 1881, t v, p. 23-24. — Le principe de la distribution de l'énergie électrique est énoncé dans cet article : « en tension ou en dérivation », et ceci, à propos des réalisations de l'Exposition internationale d'Electricité de Paris et Marcel Deprez étudie les moyens dont on dispose pour maintenir le courant constant dans la distribution « en tension », savoir : le réglage de l'intensité du champ magnétique ; l'épaisseur de l'entrefer (« distance des électros excitateurs à l'anneau ») et la vitesse de l'anneau.

41. Distribution de l'énergie par l'électricité. C. R. Ac. des Sc., 28 novembre et 5 décembre 1881, t. XCIII, p. 892-895 et 952-955. — Résumé des considérations développées en (42) relatives aux deux modes de distribution, « en série ou

en tension » et « en dérivation ou en quantité », et à l'emploi des « caractéristiques ».

42. Transport et distribution de l'énergie par l'électricité. L. E., 3 et 31 décembre 1881, t. v, p. 309-332 et 457-459. — Dans cet article est exposée l'étude de la transmission et de la distribution de l'énergie électrique. Considérant successivement le transport et la distribution, Marcel Deprez montre, en ce qui concerne le transport à distance, que les lois relatives au rendement sont les mêmes quelle que soit la forme de l'énergie au point d'utilisation, chimique, thermique ou mécanique ; en particulier, le rendement économique, c'est-à-dire le rapport de la force électromotrice inverse ou négative (que nous appelons aujourd' hui « forcer contre-électromotrice ») à la force électromotrice directe ou positive, reste constant quelle que soit la distance, « pourvu que les forces électromotrices positive et négative varient proportionnellement à la racine carrée de la résistance du circuit ». Pour la distribution, Marcel Deprez étudie à l'aide des caractéristiques les deux modes de distribution, à tension constante et à intensité de courant constante. La machine génératrice considérée dans cette étude est à deux enroulements inducteurs, l'un alimenté par une source auxiliaire, l'autre en série sur le circuit principal, pour la distribution à tension constante, ou en dérivation, pour celle à courant constant. Notons cette remarque : il est inutile, même nuisible au point de vue du rendement, d'augmenter l'excitation lorsque la saturation est atteinte.

43. Sur une forme du moteur Deprez à électroaimant circulaire. L. E., 31 décembre 1881, t. v, p. 453-454. — Dans le moteur décrit dans cet article les inducteurs sont des aimants permanents que Marcel Deprez substitue, pour augmenter le rendement de la machine, aux électroaimants

du modèle primitif mentionné dans « La Lumière électrique » du 24 septembre 1881, t. IV, p. 389.

44. Sur le travail absorbé par l'électrolyse. L. E., 7 janvier 1882, t. VI, p. 15. — Il s'agit d'une application des formules données antérieurement (42) au calcul du rendement dans la décomposition électrolytique de l'eau.

45. Galvanomètre à déviation proportionnelle. L. E., 4 février 1882, t. VI, p. 110-112. — Dans cet appareil, aux bobines enroulées sur un cadre rectangulaire des anciens modèles sont substituées deux bobines rondes et fixes. L'organe mobile est une petite plaque de fer doux, placée entre les deux bobines et dirigée suivant le champ magnétique de l'aimant permanent ; sous l'action du courant dans les bobines, dont l'axe est normal au champ magnétique de l'aimant, cette plaque de fer doux subit une déviation proportionnelle au courant.

46. Des actions électriques dans les systèmes conducteurs semblables. C. R. Ac. des Sc., 13 février 1882, t. XCIV, p. 431-433. — Dans cette note est démontré le théorème dit « des similitudes » que Marcel Deprez énonce ainsi : « Lorsque l'on augmente toutes les dimensions d'un système conducteur de forme quelconque suivant un rapport déterminé K , sans changer le flux électrique qui parcourt l'unité de section du fil, les résultantes de tous les efforts statiques élémentaires augmentent comme la quatrième puissance de K ». Marcel Deprez conclut, après sa démonstration : « On voit combien les grandes machines dynamoélectriques sont avantageuses » ; il ne cache pas que c'est bien le cas particulier de cette application du théorème des similitudes qu'il visait.

47. Sur le transport électrique de la force aux grandes distances. C. R. Ac. des Sc., 13 février 1882, t. XCIV, p. 434.

— Les résultats d'essais de transmission d'énergie à courte distance avec des conducteurs très résistants effectués par Marcel Deprez sont comparés à ceux obtenus par Hippolyte Fontaine qui utilise des conducteurs de faible résistance. Voici les résultats comparés que donne Marcel Deprez dans cette note :

	Vitesse tours	Travail utile kg-m	Travail par tour kg-m	Rende- ment	Résistance interposée ohms
Fontaine...	1 570	21,5	0,8	0,38	4,65
Deprez....	2 300	38,0	1,0	0,25	786,00

Les machines de Fontaine étaient plus grosses que celles de Marcel Deprez. Il est fait allusion, dans cette note, aux expériences de Noisiel.

48. Sur la théorie des machines dynamoélectriques et la distribution de l'énergie de M. Marcel Deprez. L. E., 25 février 1882, t. VI, p. 188-191. — Discussion entre O. Frölich et Marcel Deprez ; le premier conteste les affirmations de Marcel Deprez relatives : 1° à la relation « mal connue », selon Marcel Deprez, entre l'intensité du champ magnétique et l'intensité du courant ; 2° au fait que le rendement est indépendant de la distance ; 3° à la possibilité d'obtenir soit une tension constante soit une intensité de courant constante avec l'excitation composée proposée par Marcel Deprez.

49. Sur la comparaison entre les piles et les machines dynamoélectriques. L. E., 18 mars 1882, t. VI, p. 250-251. — Marcel Deprez détermine le nombre d'éléments de piles Bunsen à prévoir pour obtenir le même résultat que celui donné par une machine génératrice : la force électromotrice fixe le nombre d'éléments en série et la résistance intérieure, le nombre de groupes de ces éléments à monter en parallèle (ou « en quantité »).

50. Sur un instrument destiné à mesurer les variations des champs magnétiques. L. E., 25 mars 1882, t. VI, p. 270-272. — L'organe mobile est une pièce de fer doux identique comme forme et comme dimension à « l'arête de poisson » du galvanomètre décrit ailleurs (29). Cette pièce est soumise à l'action du champ magnétique de l'aimant, tandis que le couple antagoniste est dû à un poids. L'étude du fonctionnement de ce dispositif est exposée dans cet article.

51. Recherches expérimentales sur les machines dynamoélectriques. L. E., 22 avril 1882, t. VI, p. 364-366 et 29 juillet, 12 août, 2 septembre, 16 et 23 décembre 1882, t. VII, p. 114-116, 160-163, 219-222, 580-583 et 599-604. — Les essais qui font l'objet de cet article, et dont les résultats sont donnés dans des tableaux et par des courbes, portent sur cinq types différents de machines Gramme, cinq types de machines Siemens, une machine Brush petit modèle et une machine Pacinotti modifiée ; ils avaient consisté en relevés de caractéristiques à différentes vitesses. En ordonnées, Marcel Deprez porte ce qu'il appelle la force électromotrice utile, c'est-à-dire le produit $(R + r) I$ où R est la résistance du circuit extérieur et r , la somme des résistances des enroulements inducteur et induit, la machine étant à l'arrêt ; il s'agit donc de machines à excitation série et il n'était pas tenu compte « des effets dus aux extra-courants qui se produisent dans la section de l'anneau au moment où les lames du collecteur qui leur correspondent entrent en communication avec les balais, lesquels extra-courants donnent naissance à une force électromotrice inverse ». La force électromotrice maximum relevée est de 346 v avec une machine Gramme type A, à fil fin, à la vitesse de 640 t : mn, la résistance de l'induit étant de 220 ohms, celle de l'inducteur, de 410 ohms, d'où une résistance totale intérieure de 630 ohms ; le courant correspondant avait

une intensité de 2,1 A. Marcel Deprez fait ressortir la proportionnalité de la force électromotrice à la vitesse ; il rétablit à des vitesses différentes le même courant en agissant sur la résistance extérieure. En ce qui concerne l'influence des enroulements inducteurs, il montre que la force électromotrice dépend du nombre d'ampères-tours : si l'on fait varier le nombre de spires t , il faut faire varier également le courant I pour que le produit $t I$ reste constant. Etudiant l'influence des dimensions et de la nature des pièces polaires, il insiste sur l'intérêt qu'il y a à augmenter ces dimensions pour retarder la saturation ; d'autre part, ayant substitué, dans la machine du type Pacinotti modifié par lui, les pièces polaires en fer aux pièces polaires en fonte, il obtient avec cette machine 260 A et 31,44 v, au lieu de 100 A et 40,80 v, et montre que cette substitution permet d'obtenir une caractéristique sensiblement horizontale lorsque la saturation est atteinte. Cette étude approfondie des caractéristiques est suivie de résultats obtenus dans les recherches que fit Marcel Deprez en vue de déterminer à l'aide des caractéristiques les efforts statiques, se traduisant par le couple électromagnétique exercé sur l'induit ; il vérifie la formule

$$C = \frac{EI}{2\pi n}.$$

52. Sur une nouvelle forme du galvanomètre apériodique de MM. Deprez et d'Arsonval. L. E., 13 mai 1882, t. VI, p. 439-440. — La forme de l'appareil décrit ici est la forme devenue classique. L'aimant permanent, placé horizontalement dans l'ancien modèle (3), est disposé dans un plan vertical et le couple antagoniste est dû au couple de torsion du fil de suspension.

53. Galvanomètre apériodique de MM. Deprez et d'Arsonval. C. R. Ac. des Sc., 15 mai 1882, t. XCIV, p. I 347-

1 350. — Description de l'appareil tel qu'il est encore utilisé aujourd'hui (52) et indications relatives à son étalonnage par une méthode potentiométrique, à l'aide d'une pile étalon.

54. Sur les compteurs d'électricité. L. E., 27 mai et 10 juin 1882, t. VI, p. 486-491 et 534-535. — Marcel Deprez compare l'appareil décrit en février 1881 par C.-Vernon Boys, devant la Physical Society, au mesureur d'énergie qu'il a décrit lui-même en 1880 (21) et au totalisateur qu'il a imaginé en 1876,

55. Sur la loi suivant laquelle varie la force électromotrice d'une machine magnétoélectrique en fonction de la résistance du circuit extérieur. C. R. Ac. des Sc., 12 juin 1882, t. XCIV, p. 1586-1587 et L. E., 17 juin 1882, t. VI, p. 557-559. — De l'examen de caractéristiques relevées sur quelques machines de différents types et qui montrent que la force électromotrice diminue à partir d'une certaine intensité du courant lorsque celle-ci continue à augmenter, Marcel Deprez conclut à l'existence du phénomène que nous désignons aujourd'hui sous le nom de « réaction d'induit ». Il explique la distorsion du flux et indique la variation du calage des balais pour remédier à cet inconvénient.

56. A propos d'un projet d'application du système de distribution Marcel Deprez au Pavillon de Flore. L. E., 24 juin 1882, t. VI, p. 598-599. — Lettre de Marcel Deprez exposant les raisons qui l'ont obligé de renoncer à l'exécution de ce projet : refus par le constructeur de la machine Siemens destinée à cette application de la faire tourner à la vitesse indiquée par Marcel Deprez.

57. Sur un marteau-pilon électrique. L. E., 15 juillet 1882, t. VIII, p. 53-54. — Description du marteau-pilon utilisé

dans l'expérience de la distribution d'énergie électrique, le 15 juin 1882. dans le grand amphithéâtre du Conservatoire national des Arts et Métiers.

58. Sur un moyen d'augmenter la sensibilité des galvanomètres à réflexion. L. E., 22 juillet 1882, t. VII, p. 76-77. — Marcel Deprez propose une double réflexion du rayon lumineux qui éclaire le miroir du galvanomètre : une première réflexion sur ce miroir ; la deuxième, sur un miroir convexe à une certaine distance du premier.

59. Transmission du travail à grande distance sur une ligne télégraphique ordinaire. C. R. Ac. des Sc., 9 octobre 1882, t. xcv, p. 633-634. — Compte rendu des résultats obtenus dans l'essai de transmission d'énergie de Miesbach à Munich.

60. Nouvelles expressions du travail et du rendement économique des moteurs électriques. C. R. Ac. des Sc., 30 octobre 1882, t. xcv, p. 778-781 et L. E., 4 novembre 1882, t. VII. p. 446-447. — Marcel Deprez introduit la notion de « prix de l'effort statique » qu'il définit comme le rapport de la puissance perdue dans un moteur par effet Joule à l'effort électromagnétique dû au courant correspondant et appliqué au moteur au repos. Il montre que ce rapport est indépendant, pour un type de moteur donné, du diamètre des fils de l'inducteur et de l'induit ; par contre, il est fonction des dimensions relatives de l'inducteur et de l'induit et du mode de couplage de l'inducteur avec l'induit. Le rendement économique est fonction du prix de l'effort statique, de la vitesse du moteur et du rapport de la résistance intérieure du moteur à la résistance totale du circuit, y compris celle de la génératrice.

61. A propos de l'expérience de Munich et Miesbach. L. E., 11 novembre 1882, t. VII, p. 475-477. — Lettre dans

laquelle Marcel Deprez répond à une remarque de Frank Géraldy sur le rendement mesuré lors de l'expérience entreprise entre Munich et Miesbach. Il importe de s'entendre sur la définition des termes, pour éviter toute ambiguïté dans l'interprétation des résultats, telle est la thèse soutenue par Marcel Deprez qui s'efforce de montrer dans cette lettre que l'expérience en question a vérifié les résultats de sa théorie, ni plus, ni moins.

62. Sur les moteurs électriques. C. R. Ac. des Sc., 27 novembre 1882, t. xcv, p. 1056-1058. — Répondant à des objections formulées à propos des propriétés attribuées au « prix de l'effort statique » (60) Marcel Deprez rend compte d'expériences qu'il a faites pour vérifier les lois énoncées précédemment, savoir : 1° l'effort exercé sur l'armature d'un moteur est le même au repos qu'en mouvement, si le courant est le même ; 2° la variation de la force électromotrice de la génératrice est suivie de la variation du travail, mais l'intensité du courant ne change pas.

63. Sur les moteurs électriques. L. E., 2 décembre 1882, t. VII, p. 544-546. — Reproduction d'une note de Marcel Deprez, présentée à l'Académie des Sciences, le 27 novembre 1882 (62) ; cette reproduction est suivie des remarques de J. Bertrand et de Th. du Moncel qui confirment, l'un et l'autre, les résultats de Marcel Deprez, à la condition que l'on considère comme constant un effort qui ne varie que de 1 à 2 centièmes.

64. Sur un petit moteur électrique. L. E., 30 décembre 1882, t. VII. p. 627-630. — Description d'un moteur dont l'inducteur est non plus un aimant permanent, mais un électroaimant. Alimenté par deux éléments Bunsen, ce moteur entraîne une machine à coudre.

65. Sur le transport de la force. L. E., 6 janvier 1883, t. VIII, p. 5. — Dans cette note, Marcel Deprez montre que « l'avenir appartient aux grandes forces électromotrices et aux grandes machines ».

66. Sur les mesures électriques industrielles. L. E., 13 janvier 1883, t. VIII, p. 37-38. — Marcel Deprez mentionne les difficultés que présente la mesure de la tension avec un galvanomètre qui nécessite de très grandes résistances, d'où importante perte d'énergie. Marcel Deprez préconise, dans ce cas, l'électromètre lorsque la tension atteint l'ordre de 5000 à 6000 v. A noter cette remarque à propos du terme « voltmètre » : « pour employer, ajoute Marcel Deprez, le mot barbare introduit par certains savants anglais ».

67. Réponse à une note de Maurice Lévy. C. R. Ac. des Sc., 15 janvier 1883, t. XCVI, p. 192-195 et L. E., 20 janvier 1883, t. VIII, p. 68-70. — Maurice Lévy (8'), niant le fait que la force électromotrice développée dans l'induit d'une génératrice est proportionnelle à la vitesse, remplace cette loi par une série illimitée ordonnée suivant les puissances entières de la vitesse, « procédé, écrit Marcel Deprez, auquel on a recours toutes les fois qu'on ignore la véritable loi qui lie une variable à sa fonction et, à ce compte, toutes les lois de l'univers seraient représentables par une série de Mac-Laurin ». Des résultats expérimentaux reproduits dans cet article confirment la loi, qui n'est plus discutée aujourd'hui, de la proportionnalité entre la vitesse et la force électromotrice, le champ magnétique étant constant. En ce qui concerne le rendement, Marcel Deprez affirme que les « prétendus courants de Foucault » sont négligeables.

68. Recherches expérimentales sur les machines dynamoélectriques. L. E., 27 janvier 1883, t. VIII, p. 1000-

102. — Les recherches qui font l'objet de cette note avaient pour but de déterminer l'importance de la « réaction d'induit ».

69. Sur les forces naturelles. L. E., 3 février 1883, t. VIII, p. 145-146. — Parmi les sources d'énergie « que la nature met à notre disposition », Marcel Deprez considère celle due à la chaleur solaire et il établit, dans cette note, le parti que l'on pourrait en tirer.

70. Equations nouvelles relatives au transport de la force. C. R. Ac. des Sc., 19 mars 1883, t. XCVI, p. 777-779 et L. E., 24 mars 1883, t. VIII, p. 357-358. — Pour traduire en expressions ne contenant que des grandeurs mécaniques le phénomène de la transmission de l'énergie électrique à distance, Marcel Deprez utilise la notion du « prix de l'effort statique » défini antérieurement (60) qu'il fait intervenir dans l'expression du travail et dans celle du rendement. La seule grandeur électrique que contiennent les expressions établies par Marcel Deprez est la résistance.

71. Sur le transport de l'énergie mécanique. C. R. Ac. des Sc., 28 mai 1883, t. XCVI, p. 1574-1575 et L. E., 2 juin 1883, t. IX, p. 150-151. — Dans cette note il est démontré que si l'on connaît la puissance que l'on veut obtenir sur l'arbre de la réceptrice, la résistance totale du circuit et le rendement économique, toutes les autres conditions du problème peuvent être déterminées (c'est-à-dire « les forces électromotrices directe et inverse et l'intensité du courant »).

72. Moyen de désaimanter les montres qui ont été aimantées par le voisinage d'un champ magnétique. C. R. Ac. des Sc., 2 juillet 1883, t. XCVII, p. 41-42. — Courte note

se résumant ainsi : imprimer à la montre dans un champ magnétique intense un mouvement de rotation.

73. La génératrice des expériences du Chemin de fer du Nord. L. E., 7 juillet 1888, t. IX, p. 292. — Cette machine est à deux électroaimants à double enroulement, opposés par les pôles de noms contraires et à deux anneaux, ayant chacun un collecteur.

74. Sur le fonctionnement d'une turbine. C. R. Ac. des Sc., 24 septembre 1883, t. XCVII, p. 697-699 et L. E., 6 octobre 1883, t. x, p. 169-170. — Les résultats d'expériences effectuées sur la turbine qui entraînait la génératrice installée à Vizille dans les essais de Vizille et Grenoble, résultats qui sont donnés dans cet article, vérifient une relation entre la charge du frein et sa vitesse, établie par Marcel Deprez plusieurs années auparavant et qui est la suivante

$$\frac{F}{F_0} + \frac{V}{V_0} = 1$$

où F et V désignent la charge du frein et la vitesse de la turbine pour une expérience quelconque ; F_0 , la charge du frein nécessaire pour arrêter la turbine et V_0 , la vitesse de la turbine pour une charge nulle du frein.

75. Sur le synchronisme électrique de deux mouvements relatifs et de son application à la construction d'une nouvelle boussole électrique. C. R. Ac. des Sc.. 26 novembre 1883, t. XCVII, p. I 193-1 194 et L. E., 8 décembre 1883, t. x, p. 453-454. — Une application de l'appareil dénommé « comparateur annulaire de courants » est exposée dans cet article.

76. Sur les moteurs magnétoélectriques à solénoïde sectionné. L. E., 15 décembre 1883, t. x, p. 487-489. — Marcel Deprez cherche le parti que l'on peut tirer du moteur présenté par lui en 1880 à la Société française de Physique et composé d'un « solénoïde allongé dans lequel pouvait se mouvoir un noyau de fer dont la longueur était environ la moitié de celle du solénoïde ». Il a vérifié expérimentalement que l'effort exercé sur le noyau est, dans des limites étendues, proportionnel au carré du courant et non, comme dans les machines dynamoélectriques saturées, « à la première puissance du courant », d'où un avantage économique.

77. Transport et distribution de l'énergie par l'électricité. L. E., 5 janvier 1884, t.XI, p. 7-46. — Dans cet article sont réunis les articles antérieurs de Marcel Deprez sur la transmission et la distribution de l'énergie électrique. Les considérations théoriques développées antérieurement (42) et reproduites ici sont suivies de résultats d'études expérimentales sur les caractéristiques des génératrices (51) et de quelques indications sur son moteur à solénoïde sectionné (76) qui conduit au marteau-pilon.

78. Le mesureur d'énergie de Siemens. L. E., 2 février 1884, t. XI, p. 223-224. — Exposant la théorie du mesureur d'énergie de Siemens dans lequel le couple résistant est dû au frottement des ailettes dont est muni l'organe mobile et qui tournent dans l'huile, Marcel Deprez montre que ce couple est proportionnel au carré de la vitesse, d'où absence de proportionnalité entre le nombre de tours et l'énergie à mesurer, à moins que la tension soit constante ; dans ce cas il suffit d'enregistrer la quantité d'électricité et l'appareil proposé est trop compliqué. Marcel Deprez propose de substituer aux ailettes tournant dans l'huile un disque tournant entre les branches d'un aimant ; dans ce cas, il y a proportionnalité entre la vitesse et l'énergie.

79. Sur les instruments destinés aux mesures électriques industrielles. L. E., 15 mars 1884, t. XI, p. 461-462 et 5 avril 1884, t. XII, p. 5-10. — Marcel Deprez expose le principe de l'électrodynamomètre, montre que la mesure d'une force électromotrice se ramène à celle d'un courant « si l'on ne recule pas devant la question du prix de revient élevé qui résulte de l'emploi de fils de résistance d'une longueur très considérable » et indique quelques dispositions mécaniques permettant de traduire l'effet du courant par la déviation d'une aiguille convenablement placée. Il importe de choisir la solution qui conduise au « prix minimum de l'effort statique », selon une expression qui est chère à l'auteur (60).

80. Sur la mesure du rendement des générateurs secondaires. L. E., 10 mai 1884, t. XII, p. 201-202. — Marcel Deprez reprend le rapport de John Hopkinson (L. E., avril 1884, t. XII, p. 25-26), sur le « système de distribution » de Gaulard et Gibbs, rapport dans lequel sont donnés les résultats des mesures du rendement du transformateur, dit « générateur secondaire ». Il propose, pour mesurer ce rendement, de comparer les résultats que donnerait un alternateur sans transformateur à ceux obtenus avec un alternateur et un transformateur.

81. Sur un nouveau dynamomètre de transmission. L. E., 27 septembre 1884, t. XIII, p. 481-484. — Dans cet article est décrit le dynamomètre étudié par Marcel Deprez, qui devait être utilisé lors de l'expérience de la transmission de force entre Creil et Paris. L'auteur a cherché à réaliser un instrument satisfaisant aux conditions suivantes : 1° tracé des diagrammes à l'encre et par points, pendant vingt-quatre heures, sur une feuille se déroulant à raison de 1 cm : mn ; 2° totalisation du travail sans erreur possible ; 3°

inscription en chiffres usuels sur le diagramme du temps et du nombre de tours de dix en dix minutes.

82. Sur les générateurs secondaires de MM. Gaulard et Gibbs. L. E., 11 octobre 1884, t. XIV, p. 41-42. — Marcel Deprez discute le rapport d'un article de G. Colombo sur le système Gaulard et Gibbs à l'Exposition internationale de Turin (L. E., 11 octobre 1884, t. XIV, p. 43-46) ; il craint que le rendement de ces appareils n'atteigne pas des valeurs susceptibles de leur donner un intérêt pratique. A défaut d'indications précises sur les mesures faites, Marcel Deprez conclut : « Je serais porté à croire que la valeur réelle du coefficient de transformation (c'est-à-dire où il n'est pas tenu compte des pertes produites par les machines et par la ligne) ne dépasse guère 50 pour 100, si même elle atteint ce chiffre », En ce qui concerne l'adoption du courant alternatif pour la transmission de l'énergie, Marcel Deprez n'en est pas partisan, ce courant ne se prêtant qu'à l'éclairage et donnant lieu à des pertes supplémentaires dans les masses métalliques.

83. Sur les lois du frottement. C. R. Ac. des Sc., 17 novembre 1884, t.XCIX, p. 861-864 et L. E., 22 novembre 1884, t. XIV, p. 281-282. — Compte rendu des résultats d'essais de réception d'une des machines réceptrices destinées à l'expérience de transmission électrique de la force par l'électricité entre Creil et Paris : Marcel Deprez devait vérifier, en particulier, si cette machine pouvait tourner à 600 t : mn pendant une journée entière sans échauffement anormal. Il saisit cette occasion pour mesurer le travail absorbé par les résistances passives et détermine la loi de variation du coefficient de frottement par une méthode de ralentissement ; il trouve que ce coefficient diminue proportionnellement avec la vitesse.

84. Sur un galvanomètre à indications proportionnelles aux intensités. L. E., 13 décembre 1884, t. XIV, p. 401-403. — Description du galvanomètre auquel s'est arrêté Marcel Deprez pour l'expérience de transmission d'énergie entre Creil et Paris.

85. Etude comparée des divers procédés de traction applicables sur les voies ferrées (étude en collaboration avec Maurice Leblanc). L. E., 3, 10, 17, 24 et 31 janvier, 14 février, 7 et 14 mars 1885, t. XV, p. 4-10, 58-66, 107-115, 152-158, 199-206, 307-314, 447-456 et 490-498. — Dans cette étude sont décrits les différents modes de traction, électrique et à vapeur, applicables sur les voies ferrées ; l'exposé d'un projet de chemin de fer électrique dans Paris termine cet article. La comparaison de la traction par locomotive à vapeur sans foyer, de celle par locomotive à accumulateurs électriques et enfin de la traction électrique proprement dite conduit les auteurs à conclure, dans le cas envisagé, en faveur de ce dernier procédé, dont ils mettent en évidence tous les avantages.

86. Sur la régulation de la vitesse des moteurs électriques. C. R. Ac. des Sc., 27 avril et 4 mai 1885, t. c, p. 1128-1131 et 1162-1165. — Marcel Deprez étudie dans ces notes, à l'aide d'une construction graphique, le fonctionnement du moteur à excitation compound à action différeutielle, en particulier la variation du courant en fonction du couple si l'on veut maintenir la vitesse constante, la tension étant elle-même constante.

87. Transmission électrique de la force. L. E., 3, 10, 17, 24 et 31 octobre 1885, t. XVIII, p. 3-14, 55-64, 99-110, 155-161 et 199-206. — Cette étude théorique de la transmission de l'énergie électrique comprend trois parties. Dans la première, Marcel Deprez traite des machines génératrices tant au point de vue de leur fonctionnement qu'à celui de

leur construction ; on y trouve notamment des indications sur les enroulements, sur le calage des balais, sur l'excitation composée, sur le réglage de la force électromotrice, etc. ; des résultats expérimentaux sont donnés qui vérifient les résultats du calcul. La deuxième partie est consacrée aux machines réceptrices ; Marcel Deprez se borne à rappeler la propriété de la réversibilité des machines dynamoélectriques et à montrer qu'il y a une relation entre la « densité de l'effort » et la densité de courant. Dans la troisième partie est exposée la théorie générale de la transmission et de la distribution de l'énergie sur la base des résultats obtenus dans l'expérience entre Creil et Paris.

88. Expériences de transmission de la force par l'électricité entre Paris et Creil. C. R. Ac. des Sc., 26 octobre 1885, t. CI, p. 791-794. — Compte rendu de ces expériences reproduit dans ce numéro, pages 870 à 875.

89. Sur la construction des machines destinées à la transmission électrique du travail. C. R. Ac. des Sc., 14 décembre 1885, t. CI, p. 1248-1251. — Marcel Deprez signale un défaut de construction des machines construites pour l'essai de transmission d'énergie électrique entre Creil et Paris : le noyau de fer de l'anneau était composé de lames de fer doux « qui devaient être soigneusement isolées les unes des autres : elles ne l'étaient pas, ou très mal ». Un accident est également mentionné, survenu sur la ligne de transmission.

II. Liste chronologique des études critiques, favorables ou non, des travaux de Marcel Deprez relatifs à la transmission et à la distribution de l'énergie électrique. — 1'. TRESCA ; Sur la distribution du travail à distance au moyen de l'électricité. C. R. Ac. des Sc., 26 mai 1879, t. LXXXVIII, p. 1061-1062. — L'auteur attire l'attention sur les

expériences entreprises à Paris sur la transmission du travail au moyen de deux machines Gramme. Il décrit avec quelques détails une expérience de labourage électrique qui venait d'avoir lieu à la sucrerie de Sermaize (Marne).

2'. A propos d'une expérience de transport d'énergie par Marcel Deprez au Conservatoire national des Arts et Métiers. L. E., 24 juin 1882, t. VI, p. 599. — Mention est faite en une courte note d'une conférence de Marcel Deprez, le 15 juin 1882, où furent présentées quelques expériences : transport d'énergie à travers une résistance équivalant à une longueur de 50 km de fil télégraphique avec un rendement de 70 pour 100 ; distribution d'une puissance de 5 ch entre cinq appareils, soit quatre moteurs et un marteau-pilon électrique.

3'. J. SARCIA ; Sur le transport de force motrice à grande distance. L. E., 1^{er} juillet 1882, t. VII, p. 22-23. — Compte rendu de l'expérience de Marcel Deprez au Conservatoire national des Arts et Métiers.

4'. Dépêche adressée au secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences et lue le 2 octobre 1882 au sujet d'expériences concernant l'application de la méthode de Marcel Deprez pour le transport de force. C. R. Ac. des Sc., 2 octobre 1882, t. XCV, p. 592.

5'. Th. DU MONCEL ; Transport de la force par une ligne télégraphique de 60 kilomètres de longueur entre Munich et Miesbach. L. E. :, 7 octobre 1882, t. VII, p. 336-337. — Dans ce compte rendu de l'Exposition internationale d'Electricité de Munich est décrite l'expérience de Marcel Deprez qui confirme l'exactitude des résultats théoriques exposés par lui (42).

6'. Aug. GUEROUT ; L'Exposition internationale d'Electricité de Munich. L. E., 21 octobre 1882, t. VII, p. 403-404. — Nouveau compte rendu de l'expérience de Marcel Deprez entre Munich et Miesbach. D'autres tentatives ont été faites par Schuckert, avec des fils de 4 mm de diamètre sur une longueur de 5 km ; une des machines, actionnée par les chutes de l'Hirschau, fait mouvoir dans le Palais de Cristal, à Munich, une seconde machine qui fait tourner à vide deux appareils agricoles. Les résultats étaient attendus lorsque paraissait cet article.

7' Frank GÉRALDY ; A propos de l'expérience du transport de la force. L. E., 28 octobre et 4 novembre 1882, t. VII, p. 424-425 et 448-449. — Dans cet article est reprise l'expérience de Marcel Deprez entre Munich et Miesbach ; l'auteur en tire quelques enseignements sur l'évolution des conceptions relatives à la transmission de l'énergie électrique à distance et qui tendent à admettre les principes exposés et démontrés antérieurement par Marcel Deprez qui a pu en montrer, dans cette fameuse expérience, une vérification incontestable.

8'. Maurice LÉVY ; Sur une communication de M. Marcel Deprez relative au transport de force. C. R. Ac. des Sc., 11 décembre 1882, t. xcv, p. 1221-1224. — L'auteur affirme que, même pratiquement, on peut commettre de graves erreurs en admettant la proportionnalité de la force électromotrice d'une machine à sa vitesse. Il critique, d'autre part, le calcul du rendement tel que le fait Marcel Deprez en négligeant les pertes qui sont fonction de la vitesse.

9'. Th. DU MONCEL ; Le rendement électrique. L. E., 9 décembre 1882, t. VII, p. 551-557. — Dans cet article, l'auteur reprend et discute l'expérience de Marcel Deprez à Munich pour répondre à tous ceux qui ont critiqué la

solution préconisée par ce dernier, sur des bases théoriques, et dont l'expérience en question ne constitue qu'une heureuse démonstration.

10'. Th. DU MONCEL ; Transport de force par une ligne télégraphique de 60 kilomètres de longueur entre Munich et Miesbach. L. E., 3 février 1883, t. VIII, p. 129-132. — L'auteur introduit, en quelque sorte, les documents officiels relatifs à l'expérience entreprise par Marcel Deprez entre Munich et Miesbach, savoir un certificat et une lettre, et qui sont reproduits dans ce numéro, pages 869 et 870.

11' TRESKA ; Résultats des expériences faites dans les ateliers du Chemin de fer du Nord sur le transport électrique à grande distance de M. Deprez. C. R. Ac. des Sc., 19 février 1883, t. XCVI, p. 457-463. — Compte rendu des résultats avec des conclusions favorables.

12' Cornelius HERZ ; Transport électrique de la force : Expériences du Chemin de fer du Nord. L. E., 3 mars 1883, t. VIII, p. 271-283. — Compte rendu de la série d'expériences aux ateliers de la Compagnie du Chemin de fer du Nord du 6 février au 18 février 1883 et reproduction des notes présentées par Tresca qui contiennent les résultats de ces expériences et qui furent discutées à l'Académie des Sciences.

13' Rapport sur les machines électrodynamiques appliquées à la transmission du travail mécanique. C. R. Ac. des Sc., 9 avril 1883, t. XCVI, p. 992-996. — Ce rapport, établi par CORNU, au nom de la Commission qui devait suivre les essais de Marcel Deprez aux ateliers de la Compagnie du Chemin de fer du Nord, rend compte des résultats obtenus. Au début sont fixées les conditions sévères imposées : 1° transporter par l'intermédiaire du courant électrique une quantité d'énergie considérable ; 2°

la transporter à une grande distance ; 3° faire en sorte que le prix de revient spécifique des machines et des conducteurs intermédiaires ne dépasse pas une valeur donnée. De tous les essais faits jusqu'alors, seuls ceux entre Miesbach et Munich mériteraient d'être retenus, « mais, conclut Cornu, nous n'avons point à examiner ni à juger de cette expérience.... le rôle de votre Commission doit se borner à exposer succinctement les résultats des expériences auxquelles elle a pris part ». Suivent le compte rendu des essais et quelques résultats numériques.

14'. J. BERTRAND ; Transport électrique de la force à grande distance. L. E., 13 octobre 1883, t. x, p. 193-207. — Sous le titre « Des progrès de la mécanique. M. Marcel Deprez », J. Bertrand publie dans ce numéro de « La Lumière électrique » et, en même temps, dans la « Revue des Deux-Mondes » une étude sur les travaux de Marcel Deprez dans les différents domaines qui l'ont occupé. J. Bertrand, en décrivant les solutions proposées et réalisées par Marcel Deprez, le montre à l'œuvre ; d'une façon générale, il dépeint l'homme.

15'. Frank GÉRALDY ; Le transport électrique de la force : Travaux de M. Marcel Deprez. L. E., 5 janvier 1884, t. XI, p. 46-70. — Compte rendu détaillé et illustré des expériences de Marcel Deprez à l'Exposition internationale d'Electricité de Paris de 1881, de l'expérience entre Miesbach et Munich, puis de celle dans les ateliers de la Compagnie du Chemin de fer du Nord, à la Chapelle, et enfin de celle entre Vizille et Grenoble. Le compte rendu de cette dernière expérience est accompagné de la reproduction du numéro unique, du 5 septembre 1883 de « L'Energie électrique » (L. E., t. XI, p. 67) dont le directeur scientifique était Marcel Deprez et les rédacteurs, Frank Géraldy et Jules Sarcia.

16'. Gustave CABANELLAS ; Transport de l'énergie : les vérités acquises. Bulletin de la Société internationale des Electriciens avril 1884, t. I, p. 137-184. — Sur la base des résultats obtenus dans les essais de transmission de l'énergie électrique effectués jusqu'à l'époque, G. Cabanellas établit les principes d'une entreprise de transmission d'énergie électrique : potentiels très élevés ; permanence de l' « organisation » exigeant « que le substratum puisse, sans changement d'état, supporter les très hauts potentiels » ; économie de l' « organisation » nécessitant « que les diffusions d'énergie le long de la route soient restreintes malgré ces très hauts potentiels ». Reprenant les considérations de Marcel Deprez sur le rendement et les résultats qu'il a obtenus, G. Cabanellas les discute, mettant en doute les conclusions relatives aux résistances. « Ce que l'expérience a condamné, écrit Cabanellas, c'est la concentration de grandes différences de potentiel dans un volume conducteur restreint : mais ce qu'il est logique de poursuivre, c'est L'emploi de petites différences de potentiel, dans ces mêmes volumes, avec de très hauts potentiels absolus ».

17'. G. CABANELLAS ; Le transport à grande distance par l'électricité en vue de distribuer automatiquement l'énergie sous ses différentes formes : chaleur, lumière, électricité, action chimique, action mécanique. Bulletin de la Société internationale des Electriciens, octobre 1885, t. II, p. 258-281. — Dans cette conférence faite pendant l'Exposition d'Electricité, à l'Observatoire de Paris, G. Cabanellas rappelle les principes de la transmission de l'énergie électrique énoncés dans une communication antérieure (16') et décrit les solutions que l'on peut envisager pour sa distribution : il préfère au réglage automatique de la machine à excitation compound, qui conduit à des machines de trop grandes dimensions, le

réglage « mécanique » et décrit, parmi d'autres solutions, l'appareil de Gaulard et Gibbs.

18'. B. MARINOVITCH ; Transmission électrique de la force entre Paris et Creil. L. E., 7, 14, 21 et 28 novembre 1885, t. XVIII, p. 241-249, 296-306, 344-351 et 387-393. — Description détaillée des machines génératrices et réceptrices utilisées dans l'expérience de transmission entre Paris et Creil et de leur installation respectivement à la station de Creil et aux ateliers de la Chapelle, à Paris.

19'. A. SARTIAUX ; Examen des causes qui ont entravé un instant les expériences de transport de force entre Creil et Paris. C. R. Ac. des Sc., 14 décembre 1885, t. ci, p. I 251-1252. — Dans cette note est expliqué l'accident survenu sur la ligne de transmission d'énergie entre Creil et Paris, accident dû à un contact établi entre cette ligne, en conducteurs nus, et un fil télégraphique « par un arbre que la grande pluie de toute la journée avait rendu suffisamment bon conducteur. Le courant venant de Creil s'est écoulé, en partie, par le fil de fer de cette communication télégraphique et a produit l'étincelle constatée à la Chapelle et à Creil ».

20'. G. CABANELLAS ; Transport de l'énergie par l'électricité : Expériences entre Creil et Paris. Bulletin de la Société internationale des Electriciens, janvier 1886, t. III, p. 6-13. — Dans cette communication est reproduit le texte du programme des expériences de transmission électrique à exécuter entre Creil et Paris d'après le traité passé en 1883 entre MM. de Rothschild frères et consorts et le Syndicat français d'Electricité ; le programme fut établi par les ingénieurs du Chemin de fer du Nord et accepté par Marcel Deprez. Ce texte est suivi d'un extrait de la note (88) à l'Académie des Sciences, relative aux résultats des deux premières expériences. Quelques

renseignements sont donnés ensuite sur les machines utilisées, notamment au point de vue de leur poids.

21'. Maurice LÉVY ; Sur les expériences de M. Marcel Deprez relatives au transport de la force entre Creil et Paris. C. R. Ac. des Sc., 2 août 1886, t. CIII, p. 314-340. — Dans cet important rapport est d'abord défini l'objet de ces expériences qui était de transmettre une puissance de 200 ch, disponible à la station de Creil, à la gare de la Chapelle, à 56 km de distance avec un rendement de 50 pour 100. Ensuite sont indiqués les difficultés et insuccès des premières expériences et leurs causes. L'auteur donne le détail de la constitution de la génératrice, qui dut subir des réfections à la suite des premiers essais ; suivent des considérations sur la ligne elle-même, sur les excitatrices, celle à la station de Creil et l'autre à la gare de la Chapelle ; la première est une machine à excitation série et la deuxième, une machine à excitation composée. L'auteur traite ensuite du rôle du « commutateur de démarrage » à la Chapelle intervenant pour relier le « circuit local » à la ligne et pour le séparer lorsque la réceptrice a démarré, entraînant son excitatrice. La réceptrice actionne aussi une génératrice pour la distribution de l'énergie à quatre machines. Enfin il est rendu compte des résultats constatés par la Commission présidée par J. Bertrand. Ces résultats sont longuement discutés et commentés dans la suite du rapport.

22'. Maurice LEBLANC ; Nécrologie de Marcel Deprez. Revue générale de l'Electricité, 7 décembre 1918, t. IV, p. 857-858.

III. Table analytique des questions étudiées par Marcel Deprez. — A. Mécanismes. — 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 14, 16, 19, 22, 23, 27, 28, 32, 33, 81.

B. Théorie et applications des aimants et électroaimants et des machines magnétoélectriques. — 6, 7, 8, 11, 15, 17, 23, 27, 28, 30, 32, 43, 57, 64, 72, 76.

C. Instruments de mesure des grandeurs électriques et mécaniques. — 18, 20, 21, 25, 26, 29, 34, 37, 38, 39. 45, 50, 52, 53, 54, 58, 66, 75, 78, 79, 81, 84.

D. Traction électrique. — 24, 85.

E. Théorie et essais des machines dynamoélectriques. —
1. CARACTÉRISTIQUES. — 31, 35, 48, 51, 55, 67, 68, 86, 87, 8'.

2. RENDEMENT. — 18, 48, 60, 61, 83, 9'.

3. DESCRIPTION ET CALCUL. — 46, 62, 63, 73, 87, 88, 89, 18'.

F. Théorie de la transmission de l'énergie électrique. — 36, 42, 47, 49, 61, 65, 70, 71, 77, 87, 7'.

G. Théorie de la distribution de l'énergie électrique. — 40, 41, 42, 48, 56, 77, 87.

H. Résultats d'essais de transmission et de distribution de l'énergie électrique. — 47, 5g, 61, 88, 1', 2'. 3', 4', 5', 6', 7', 10', 11', 12', 13', 15', 16', 17', 18', 19', 20', 21'.

I. Questions diverses. — 44 (électrolyse), 69 (forces naturelles), 74 (turbine hydraulique). 80 et 82 (transformateurs), 14' et 22' (Marcel Deprez et son œuvre).

Récompenses et distinctions honorifiques décernées à Marcel Deprez

1. PRIX MONTYON (Mécanique) décerné par l'Académie des Sciences à Marcel Deprez dans sa séance du 23 avril 1877, pour l'intégrateur et pour l'indicateur de pression. C. R. Ac. des Sc., 23 avril 1877, t. LXXXIV, p. 810-811.

2. RÉCOMPENSE A L'EXPOSITION UNIVERSELLE DE VIENNE DE 1878, pour le wagon dynamomètre de la Compagnie des Chemins de fer de l'Est.

3. PRIX TRÉMONT décerné par l'Académie des Sciences à Marcel Deprez dans sa séance du 10 mars 1879, pour ses applications des forces électriques à la solution de divers problèmes de mécanique. C. R. Ac. des Sc., 10 mars 1879, t. LXXXVIII, p. 507.

4. NOMINATION AU GRADE DE CHEVALIER ET PROMOTION AU GRADE D'OFFICIER DE LA LÉGION D'HONNEUR, 18 janvier 1881 et 12 avril 1883.

5. GRAND DIPLÔME D'HONNEUR A L'EXPOSITION INTERNATIONALE D'ELECTRICITÉ DE PARIS DE 1881, pour la solution des problèmes de la distribution de l'énergie électrique.

6. PRIX FOURNEYRON décerné par l'Académie des Sciences à Marcel Deprez dans sa séance du 5 mai 1884, pour les expériences aux ateliers de la Compagnie du

Chemin de fer du Nord et pour celles de Vizille à Grenoble.
C. R. Ac. des Sc., 5 mai 1884, t. XCVIII, p. 1095.

7. ELECTION DE MARCEL DEPREZ A L'ACADÉMIE DES SCIENCES (SECTION DE MÉCANIQUE), dans sa séance du 1^{er} mars 1886 par 36 suffrages sur 52 votants. C. R. Ac. des Sc., 1^{er} mars 1886, t. CII, p. 488. — Elève externe en 1865 à l'Ecole supérieure des Mines, secrétaire de Combes, alors directeur de l'Ecole, Marcel Deprez occupe cette situation de 1866 à 1872 ; s'occupe ensuite de mécanismes, puis, après l'Exposition internationale d'Electricité de Paris, en 1881, se voue à l'électricité industrielle. Maurice Lévy, dans son rapport à l'Académie des Sciences, signale le wagon dynamomètre de la Compagnie des Chemins de fer de l'Est ; l'excitation composée des machines dynamoélectriques en vue de les adapter aux conditions imposées par la distribution de l'énergie électrique ; la première réalisation, entre Creil et Paris, du transport de force à haute tension (5 800 v), dont O. Frölich a exposé la première théorie à l'Académie des Sciences de Berlin le 18 novembre 1880 ; enfin le théorème des similitudes.

En marge des expériences de Marcel Deprez entre Creil et Paris : l'installation de transmission et de distribution d'énergie électrique à Bourganeuf (Creuse)

Peu de temps après les expériences de Creil à Paris, qui eurent lieu d'octobre 1885 à août 1886, Marcel Deprez appliqua le procédé qui avait fait ses preuves à l'alimentation en énergie électrique de la ville de Bourganeuf, dans la Creuse. Le 3 novembre 1888, a paru à ce propos dans « La Lumière électrique » la note ainsi conçue : « La Société pour la transmission de la force par l'électricité (Société Géraldy-Deprez) vient d'établir à Bourganeuf une station centrale sur laquelle on nous fournit les renseignements suivants : L'usine utilise la chute des Jarrauds, commune de Saint-Martin-Château, d'une puissance totale de 1 000 à 1 200 ch et située à 13,6 km de Bourganeuf. Une première turbine de 150 ch, fournie par la Société alsacienne de Constructions mécaniques, est mise en place ; elle est destinée à alimenter 700 lampes à incandescence pour l'éclairage de la ville et à fournir 30 ch de force motrice pour différentes industries. La société qui avait entrepris, il y a deux ans, l'éclairage de la ville de Bourganeuf avait malheureusement pris sa force motrice sur une chute d'eau qui tarissait l'été et n'a pu continuer à fournir le courant aux 250 lampes pour lesquelles elle avait pris des engagements. Le courant sera fourni par des machines Marcel Deprez à deux anneaux ; une génératrice, une réceptrice et deux machines à lumière seront prochainement mises en place ».

Des renseignements complémentaires sont donnés sur cette installation par Marcel Deprez lui-même dans le numéro du 21 septembre 1889 de « La Lumière électrique ».

Récemment, M. le docteur Jean Butaud, président du Syndicat d'Initiative de Bourganeuf, ayant eu connaissance de la célébration du cinquantenaire des expériences de Marcel Deprez, nous a adressé une lettre où sont relatées les conditions dans lesquelles ont été entrepris les premiers essais et les travaux concernant cette installation. Voici les principaux passages de cette lettre.

« M. Ernest Lamy, ingénieur électricien, 14, rue du Sentier, à Paris, est venu en 1884, a fait des essais d'éclairage électrique à la mairie de Bourganeuf.

Le 18 février 1885, il passa un traité avec M. Misme, qui possédait une chute d'eau dans Bourganeuf, pour l'éclairage électrique de la ville.

» Le numéro du 20 juin 1886 du journal « Le Travail », publie la note suivante : « La ville de Bourganeuf est aujourd' hui éclairée par l'électricité irradiant soixante lampes municipales ; les établissements publics et industriels et quelques installations particulières jouissent du même éclairage ».

» La chute d'eau de Bourganeuf avait un débit irrégulier.

» M. Pasquait, propriétaire d'une chute de 14 m sur la rivière La Maulde, au lieu des Jarrauds, signala cette chute.

Des expériences furent faites à la cascade des Jarrauds (commune de Saint-Martin-Château), distante de 14 km de Bourganeuf, par Marcel Deprez, Ernest Lamy et Henrique pour la transmission de la force à distance : M. de Rothschild était bailleur de fonds.

» Les plans de l'usine des Jarrauds ont été dressés et présentés par l'ingénieur en chef des scieries mécaniques, M. Singre et datent de septembre 1888.

» M. Caperon, qui était conducteur des travaux à Creil, est venu conduire l'usine de Bourganeuf qui recevait le

courant de l'usine des Jarrauds. »

Voici, d'autre part, d'après la description que donne Marcel Deprez, quelques caractéristiques de cette installation. La puissance de la turbine hydraulique était de 130 ch ; elle entraînait une génératrice de 100 ch, à deux anneaux, montés sur le même arbre. La ligne était en fil nu de 5 mm de diamètre. La réceptrice, à Bourganeuf, identique à la génératrice tournant à une vitesse qui ne dépassait pas 500t : mn commandait deux « machines à lumière », c'est-à-dire deux génératrices, construites par la maison Breguet, à excitation en dérivation, de 130 v et 250 A chacune ; une batterie d'accumulateurs de 60 éléments complétait l'équipement de ce poste de la réceptrice. Deux agents suffisaient pour assurer le service, l'un, à Saint-Martin-Château, l'autre à Bourganeuf.

Œuvre et vie de Lucien Gaulard réalisateur du premier transformateur à courant alternatif

Le 6 février 1884, la Société française des Electriciens, qui s'appelait alors la Société internationale des Electriciens, tenait sa première réunion mensuelle ; à l'ordre du jour, se trouvait une communication ⁷ d'un jeune inventeur, Lucien Gaulard, devenu électricien après avoir fabriqué des explosifs, et auteur d'un générateur thermoélectrique qui avait figuré à la fameuse Exposition internationale d'Electricité de Paris de 1881.

Bien peu d'électrotechniciens de l'époque actuelle savent ce qu'était l'appareil présenté par lui ce jour-là sous le nom de « générateur secondaire » ! Pourtant, c'était sans conteste possible la première réalisation du « transformateur à courant alternatif » ⁸.

Lucien GAULARD ⁹
(1850-1888).



En 1884, on utilisait déjà depuis une quinzaine d'années les génératrices à courant alternatif, ancêtres des

alternateurs modernes, pour l'alimentation de circuits d'éclairage d'un très faible développement, mais les éléments les plus rudimentaires de la théorie des courants alternatifs n'étaient connus que d'un très petit nombre de savants tels que J. Joubert, E. Mascart, A. Potier, O. Heaviside, G. Ferraris.

Il est donc véritablement étonnant que le premier transformateur statique ait été construit par un homme dont les connaissances théoriques étaient très limitées, et que celui-ci ait immédiatement compris tout l'intérêt de cet appareil ; si jamais une œuvre a pu être qualifiée de géniale, c'est bien celle de Lucien Gaulard.

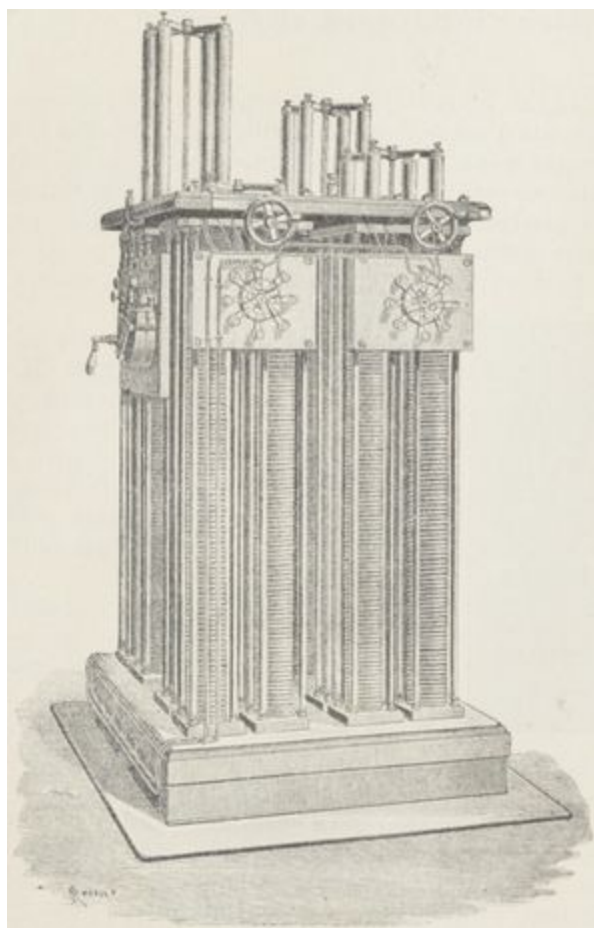
Par une extraordinaire intuition, il avait entrevu la nécessité d'assurer une induction mutuelle aussi élevée que possible entre les enroulements primaires et secondaires, ce résultat étant obtenu par un « sandwichage » très poussé. Les extrémités des enroulements secondaires venaient aboutir à des commutateurs permettant de faire varier leur groupement suivant la nature de l'utilisation.

L'appareil était réalisé sous forme de longues colonnes verticales (fig. I), le noyau étant formé de faisceaux de fils de fer à l'instar des bobines de Ruhmkorff. Rappelons en outre que Gaulard avait adopté un circuit magnétique ouvert, aucune culasse n'étant prévue pour réunir les noyaux portant les enroulements.

Cette circonstance fut violemment reprochée à l'inventeur au cours de procès qui seront mentionnés dans la suite. Pourtant, l'appareil avait déjà un rendement des plus convenables, voisin de 90 pour 100, qui constituait le record pour l'époque en fait de matériel électrique. D'ailleurs, l'existence d'un courant magnétisant très important n'avait pas, dans le cas d'une distribution en série préférée par Gaulard, un aussi grave inconvénient que dans le cas d'une distribution en dérivation.

A l'époque de sa communication à la Société internationale des Electriciens, il séjournait à Londres ¹⁰ où il venait de procéder à l'installation d'une distribution d'éclairage sur la ligne du chemin de fer souterrain. La génératrice Siemens d'une puissance de 30 ch (sic) était reliée à une ligne de 25 km de longueur ; 141 lampes à incandescence Swan et 6 lampes à arc Jablochkoff étaient ainsi alimentées par 4 transformateurs ayant leurs primaires embrochés sur la ligne en question. En outre, Gaulard connaissait la réversibilité des génératrices à courant alternatif, et, à la station de « Notting Hill Gate », le transformateur alimentait également un moteur synchrone, dont la constance de vitesse constituait, aux yeux de notre génial collègue, un avantage sérieux pour la conduite des machines-outils ¹¹.

Fig. I. — Vue du « générateur secondaire » (ou transformateur)
de Lucien Gaulard.



Le grand électricien anglais J. Hopkinson fit, à l'occasion de cette installation, un rapport fort élogieux tendant à établir l'excellence du rendement obtenu ; il faut bien avouer que ce rapport suscita quelque peu l'incrédulité des techniciens de l'époque et malheureusement, les Français ne furent pas les plus bienveillants. Déjà, dans le numéro de juin 1884, du « Bulletin de la Société internationale des Electriciens » ¹², E. Hospitalier critique le rapport du docteur Hopkinson, qu'il considère comme trop favorable à l'appareil de Gaulard. Il faut dire qu'à cette époque, l'attention du monde de l'électricité était fixée, surtout en France, sur les applications du courant continu à haute

tension au transport de l'énergie. Même sur ce terrain, deux camps s'étaient formés.

Les uns, à la suite d'Hippolyte Fontaine, estimaient que la solution la plus pratique consistait à coupler en série plusieurs machines de puissance et de tension relativement modérées ; parmi ces électriciens, il convient de citer en tête G. Cabanellas, ancien officier de marine, fondateur comme L. Gaulard de la Société internationale des Electriciens, qu'on peut considérer comme le précurseur de R. Thury, et dont les très intéressants travaux demeurèrent obscurs, en raison d'une terminologie vraiment très spéciale (il appelait, par exemple, l'ampèremètre « organe vigilant », etc.).

Les autres préconisaient l'usage d'une seule génératrice et d'une seule réceptrice, de puissance et de tension aussi élevées que possible ; c'était la solution expérimentée à l'Exposition internationale d'Electricité de Munich de 1882, puis aux ateliers de la Compagnie du Chemin de fer du Nord et à Grenoble par l'illustre inventeur Marcel Deprez. Dans les pages qui précèdent, on a cherché à retracer les travaux de ce grand Français, dont les créations connurent la plus extraordinaire diversité ; [wattmètre, indicateur de vitesse magnétique, compteur à moteur attribué à Elihu Thomson, dynamo compound, dynamo-frein, boussole à induction du champ magnétique terrestre, commande à distance par courant diphasé et récepteur synchrone (1879), lui sont dus parmi une multitude d'inventions qui s'étendent à la machine à vapeur et aux engins mécaniques les plus variés.] Il est peut-être intéressant de tracer un parallèle entre lui et L. Gaulard parce qu'ils personnifient deux classes d'inventeurs.

Marcel Deprez avait eu la chance de pouvoir commencer ses études à l'Ecole supérieure des Mines, à Paris, dont le directeur, Ch. Combes, avait déjà été frappé par son esprit très inventif et ses remarquables facultés d'assimilation ; dans la suite, il obtint le patronage très affectueux du

mathématicien Joseph Bertrand et finalement le concours de puissants banquiers lui permit les célèbres expériences de Creil, faisant suite à celles de Grenoble. Il s'intéressait à de très nombreuses questions relatives à l'électricité, à la mécanique et à la thermodynamique et en plus des inventions capitales rappelées ci-dessus, on lui doit une foule d'appareils encore usités à l'heure actuelle. A notre avis, en ce qui concerne la transmission de l'énergie par l'électricité, son mérite essentiel fut surtout d'attirer l'attention du monde scientifique et industriel sur les possibilités de cette application ; il est assez curieux de constater qu'après avoir lui-même reconnu la réversibilité de la bobine de Ruhmkorff, c'est-à-dire la possibilité de recueillir un courant à basse tension du gros fil d'une bobine dont le fil fin est relié à celui d'une seconde bobine fonctionnant normalement et avoir passé, de plus, à deux doigts de la découverte du moteur à induction à champ tournant, Marcel Deprez fit le procès du transformateur à courant alternatif dans un article publié dans « La Lumière électrique » du 11 octobre 1884, page 41 ¹³. Tant il est vrai que les plus grands esprits peuvent commettre de faux jugements, sous l'influence de la passion !

L. Gaulard était au contraire l'homme d'une seule idée, d'une seule cause, c'est un apôtre... Après quelques essais, il trouve sa voie et désormais il se consacre uniquement à la réalisation du transport et de la distribution de l'énergie par courants alternatifs. Il est associé avec un commanditaire, Gibbs, et finit par pouvoir organiser à l'Exposition internationale de Turin une installation comportant la transmission d'un courant produit par un alternateur à 2000 v installé dans la galerie de l'Electricité à l'Exposition jusqu'à la gare du chemin de fer de Lanzo située géographiquement à 30 km environ ; la ligne était constituée par un fil de cuivre ayant 3.7 mm de diamètre.

Dans le numéro de « La Lumière électrique » qui contient la critique de Marcel Deprez, on trouve immédiatement après (page 43) ¹⁴ un article fort élogieux du professeur G. Colombo, qui avait parfaitement compris l'énorme intérêt de l'expérience ainsi réalisée.

Dans un mémoire rédigé par Gaulard peu de temps avant sa mort, on trouve d'ailleurs un récit fort pittoresque et fort émouvant de l'organisation et de la mise en route de l'installation de Turin.

Nous sommes heureux de pouvoir reproduire ici ce récit :

... Après m'être entendu avec MM. Wurgler et de Lassus, je m'adressai à la maison Siemens frères de Paris, pour lui commander le matériel qui m'était nécessaire et je priai ces messieurs de s'adresser à la Banque d'Escompte pour ratifier ces commandes et quinze jours après je fus très surpris d'apprendre que la banque se refusait à toute ratification.

Je vins à Paris pour savoir du baron de Soubeyran ce que cela voulait dire ; il me répondit que les inventeurs étaient tous les mêmes, mais que les maisons de banque devaient être prudentes, qu'il fallait examiner la question et qu'il n'avait pas le temps pour le moment de s'en occuper.

Comprenant alors que je n'avais à compter sur aucun concours pour l'Exposition de Turin, je fus dans l'obligation de faire démonter le matériel que j'avais établi pour le chemin de fer métropolitain, malgré l'opposition de ma compagnie, pour aller tenir le défi que j'avais lancé à tous les électriciens.

Le concours pour le meilleur système de transport d'énergie électrique à grande distance avait été établi sur les inspirations de Sa Majesté la Reine d'Italie, à la suite du retentissement des expériences de Marcel Deprez, à Munich, en 1882.

Je fus très surpris d'apprendre, en arrivant à Turin, que la commission scientifique avait demandé au Ministère de modifier, en l'étendant, le programme, sous prétexte qu'il n'y aurait pas de concurrents pour le prix tel qu'il avait été primitivement établi.

Pour l'ouverture de l'Exposition, faite solennellement par Leurs Majestés le Roi et la Reine d'Italie, les appareils ayant été déposés à l'Exposition même, on me fit l'honneur de me présenter à Leurs Majestés, qui voulurent bien me demander des explications sur le fonctionnement de mon système et sur la différence qui existait entre mon procédé de transport à distance de l'énergie électrique et les expériences faites antérieurement par M. Marcel Deprez

Après une demi-heure de conversation, le roi se retirait en me serrant la main et j'appris quelques jours après qu'un décret mettait par moitié à la charge de l'Etat et de l'Administration de l'Exposition les frais nécessités par les expériences du concours.

J'entrepris alors, à l'Exposition même, aidé du concours bienveillant de M. Uzel, de faire les mesures sur le rendement des appareils à l'aide de la méthode de MM. Joubert et Potier et je démontrai à l'étonnement de tous les ingénieurs électriciens représentant les expositions administratives et industrielles que le rendement effectif s'élevait à 90 pour 100. Une fois que le résultat fut connu, je vis les difficultés se multiplier autour de moi.

A cause des quarantaines imposées par le gouvernement italien, les visiteurs étaient peu nombreux, l'Administration de l'Exposition ne faisant pas de brillantes recettes ne semblait pas disposée, malgré le décret signalé plus haut, à faire les frais nécessaires à la démonstration que je m'étais promise, à l'aide d'un circuit de 80 km pour égaler celui projeté entre Creil et Paris.

Cependant, l'ingénieur Bignani, directeur du chemin de fer de Torino-Cirie et Lanzo, auquel je dois une reconnaissance très grande, pour le dévouement avec

lequel il m'a jusqu'au bout prêté son concours, se mit entièrement à ma disposition pour me faciliter ces expériences. C'est alors que fut résolu l'établissement de la ligne réunissant l'Exposition à la gare de Lanzo, en utilisant les poteaux télégraphiques.

Restait à trouver le conducteur de cuivre, qui représentait une dépense assez considérable ; c'est alors que je m'adressai à un industriel français, M. Mouchel, qui consentit à mettre gracieusement à ma disposition les 80 km de ligne qui m'étaient nécessaires.

J'en avais demandé l'expédition par grande vitesse. Je ne sais par suite de quelle influence, malgré les ordres formels donnés par l'expéditeur, ce fil ne fut transporté de Paris à Modane que par petite vitesse.

Lorsque la lettre de voiture me fut communiquée, je m'aperçus qu'elle réclamait le prix du transport par grande vitesse. Comme je n'avais pas la somme nécessaire pour en acquitter le montant, je dus signaler à Paris, à M. Mouchel, que le cuivre qui m'avait été expédié l'avait été par petite vitesse jusqu'à Modane, afin qu'il puisse faire les réclamations nécessaires.

Mais, dans toutes les administrations, lorsqu'on est obligé de réclamer, les réponses se font attendre longtemps, et ces retards furent cause que la ligne ne put être complètement terminée que pour le 28 septembre.

Mais le jury avait décidé de se séparer le 30, et comme le choléra sévissait alors à Turin, il était impossible d'obtenir un jour de délai.

Je fus prévenu le dimanche 28 septembre, à 3 heures de l'après-midi, par M. Bignani, qu'il avait organisé, pour le lendemain 29, un banquet à la station de Lanzo, pour les autorités de Turin, le Comité général de l'Exposition, et les membres du jury international d'électricité. J'avais, en conséquence, à me mettre en mesure pour que la station de Lanzo fût éclairée électriquement pour ce jour.

Dans la soirée de ce même dimanche, je fus prévenu, d'autre part, que le jury procéderait le lendemain matin, de 9 heures à midi, aux mesures de rendement sur les appareils en fonction à l'Exposition même.

A 11 heures du soir, je me rendis à la gare de Turin pour y porter les générateurs secondaires qui devaient, le lendemain soir, fonctionner à Lanzo.

Un de mes ingénieurs partait le lendemain matin, à 6 heures, avec les appareils, avec ordre de les mettre en place et de me télégraphier aussitôt qu'il serait prêt, pour que je puisse lui envoyer le courant et essayer, au moins une fois, le fonctionnement de la ligne et des appareils.

J'étais moi-même retenu à l'Exposition par le jury, pour assister aux mesures auxquelles il procéda jusqu'à midi. Le rendement de 90 pour 100 ayant été officiellement constaté, j'avais lieu d'être satisfait, mais j'attendis jusqu'à 5 heures, heure de la fermeture de l'Exposition, la dépêche de mon ingénieur, qui ne vint pas.

Le train spécial partant à 6 heures, je me rendis à la gare où je rencontrai mon ingénieur qui m'accueillit par ces mots : « Depuis 11 heures du matin, j'attends le courant ; lassé d'attendre, je suis revenu ». Il m'avait, en effet, télégraphié dès 11 heures du matin, et je n'ai jamais pu savoir pour quelle raison la dépêche ne m'était pas parvenue. Je lui donnai l'ordre de se rendre directement à l'Exposition, et de mettre en marche les machines à 7 heures et demie précises.

Le train spécial arrive à 7 h 20 mn à Lanzo. Quelques chandelles éclairent la salle du banquet. J'examine rapidement si tous les appareils sont bien en place, si tous les appareils sont bien assujettis ; j'attends la montre en main que 7 heures et demie sonnent : 7 h 35 mn, rien ; 7 h 40 mn, rien ; 7 h 45 mn, rien, je commence à désespérer ; toutes les idées me passent par la tête : un contact a dû se produire sur la ligne, un fil a pu être coupé, car j'ai le droit de me défier de toutes les malveillances ; et comme je sens

qu'il me sera impossible de recommencer cette expérience le lendemain, puisque le jury doit partir, et que j'entends les rires et les plaisanteries au-dessus de ma tête, je me sens devenir fou.

Enfin, à huit heures moins 5, j'aperçois tout à coup l'électrodynamomètre qui se met en mouvement, et la lumière jaillit au milieu des applaudissements de tous les invités.

Je n'ai eu que le soir, à minuit, l'explication du retard dans l'arrivée du courant à Lanzo, qui avait failli me coûter si cher : avant la fermeture de l'Exposition, à 5 heures, on avait distribué au personnel qui devait revenir pour les expériences du soir des cartes spéciales qu'on devait présenter au poste de garde ; mais on n'avait laissé à ce poste aucune personne compétente du service ; mon ingénieur, un Français que je n'avais rencontré à la gare de Turin qu'à 5 heures et demie, ne parlant pas italien, se vit impitoyablement refuser l'entrée de l'Exposition par le poste de police ; il courut par toute la ville inutilement pour rencontrer quelqu'un capable de le faire reconnaître ; obligé d'entrer à l'Exposition en escaladant une clôture, il n'avait pu remplir son office qu'avec une demi-heure de retard.

Les expériences de Lanzo eurent lieu non seulement en présence du jury ¹⁵, mais encore, avec le plus grand succès, devant le ministre des Travaux publics d'Italie, et plus de trois cents ingénieurs et architectes italiens réunis à Turin à l'occasion d'un congrès.

En présence de ce résultat, Gaulard fut décoré de la Couronne d'Italie et le jury lui décerna un grand prix de 10000 lire fondé par le gouvernement italien. D'ailleurs, comme on vient de le lire, l'inventeur tint à porter à 80 km la longueur de la ligne primaire qui formait ainsi une boucle entre Turin, Venaria et Lanzo ; c'était la longueur

prévue pour les expériences de Marcel Deprez entre Paris et Creil, expériences alors en préparation.

Rappelons ici que Gaulard avait non seulement prévu l'utilisation de moteurs synchrones, mais qu'il envisageait le redressement éventuel du courant au moyen de commutateurs entraînés synchroniquement, ancêtres du fameux panchahuteur de Maurice Leblanc. Enfin, un régulateur à solénoïde et à bain de mercure ¹⁶ agissait sur un rhéostat inséré dans le circuit d'excitation de l'alternateur et maintenait à une valeur constante le courant primaire de la distribution. Il s'agissait donc bien d'un système complet de transport et de distribution.

Le succès de l'installation de Turin souleva un intérêt considérable dans la presse technique ; mais tandis que certains électriciens mettaient en doute, avec Marcel Deprez, le haut rendement revendiqué par Gaulard pour ses transformateurs, d'autres se mirent à contester la nouveauté du système. En France, G. Cabanellas fut un des rares électriciens de valeur à admettre les résultats obtenus par Gaulard ; champion du transport de l'énergie par courant continu à haute tension et à intensité de courant constante, suivant le principe appliqué ultérieurement par R. Thury, il proposait même, par une géniale intuition, de transformer à l'arrivée le courant continu en courant alternatif et d'utiliser celui-ci pour la distribution. Heureusement pour l'inventeur, les expériences de Turin éveillèrent l'attention d'un grand savant italien, Galileo Ferraris, et celui-ci établit pour la première fois une théorie exacte et complète du fonctionnement du transformateur ¹⁷. Cette théorie lui permit d'affirmer l'exactitude des allégations de Gaulard et il procéda à de multiples vérifications expérimentales du rendement à diverses charges. Ce fut donc dans la patrie des Galvani, des Volta, des Pacinotti que notre compatriote trouva l'appui le plus effectif à tous égards, et pour notre

part, nous tenons à souligner ce bel exemple de collaboration franco-italienne.

Gaulard réussit pourtant, grâce au concours de M. Naze, à obtenir la concession de l'éclairage électrique de Tours ; la mise en marche de la centrale eut lieu le 18 janvier 1886. Les deux machines génératrices Siemens étaient entraînées par des moteurs à vapeur de 100 et 150 ch, et cette fois-ci Gaulard avait adopté un système de distribution en dérivation. D'après un article publié par P. Clémenceau, frère du grand patriote, dans « La Lumière électrique » du 22 mai 1886, page 340 ¹⁸, la tension primaire, réglée primitivement à 825 v, devait être portée dans la suite à 2500 v ; la tension secondaire ne dépassait pas 50 v.

Là devait s'arrêter la carrière industrielle de notre infortuné collègue ; les vicissitudes d'un procès engagé contre les licenciés des brevets Zipernowsky, Deri et Blathy affectèrent un cerveau déjà exalté par une lutte des plus fatigantes soutenue pendant plusieurs années. Avec son caractère d'apôtre, Gaulard comprenait mal la question des brevets ; il considérait comme une injustice la possibilité d'opposer des indications plus ou moins vagues, non vérifiées expérimentalement, à des réalisations concrètes, telles que celles de Londres et de Turin. En tout cas, ce n'est pas diminuer le mérite des ingénieurs qui, à sa suite, ont rapidement amené le transformateur à un admirable degré de perfection que de considérer Gaulard comme le réalisateur du premier transformateur à courant alternatif.

Fig. 2. — Vue du monument élevé, à Lanzo, à la mémoire de Lucien Gaulard.



Il avait déjà donné publiquement quelques signes de dérangement cérébral, quand, dans la nuit du samedi II au dimanche 12 février 1888, il se présenta au concierge de l'Elysée en déclarant : « Je suis Dieu, et je veux la paix universelle ». Conduit au poste de police où son identité fut établie, il dut finalement être interné à l'asile clinique de Sainte-Anne ; il habitait alors l'hôtel Windsor, rue de Castiglione. Son état alla en empirant et il mourut le 26

novembre 1888 ¹⁹. Un discours émouvant fut prononcé sur sa tombe par J. Bourdin, collaborateur de « La Lumière électrique » ; il est reproduit dans le numéro du 8 décembre de ce journal, page 497 ²⁰. G. Ferraris publia dans l'« Ingegneria civile e le Arti industriali », tome XIV, une nécrologie qui constitue un magnifique hommage à la mémoire du malheureux inventeur. Les droits de celui-ci aux Etats-Unis d'Amérique avaient été achetés par la Société Westinghouse qui devint ainsi, là-bas, la championne du courant alternatif ; mais ce fut, hélas ! un succès trop tardif.

On avait songé à lui décerner le prix Volta, dont les précédents titulaires avaient été le Danois Ruhmkorff et l'Américain Graham Bell ; ce geste l'eût sans doute sauvé, mais on lui préféra l'inventeur belge Zénobe Gramme, déjà comblé d'honneurs et de profits, dont le mérite exceptionnel était incontestable, mais qui n'était même pas le premier réalisateur de la dynamo...

Il existe à Paris, dans le dix-huitième arrondissement, une rue Lucien-Gaulard ; elle réunit la place Constantin-Pecqueur et le cimetière Saint-Vincent. Cette dénomination fut attribuée sur la pieuse initiative de sa sœur, Mine Ruelle-Gaulard, par arrêté préfectoral du 24 juin 1907 ; elle avait fait l'objet, au préalable, des délibérations des 31 décembre 1904, 18 février et 11 mars 1907.

L'arrêté en question fait mention d'un monument élevé à la mémoire de Lucien Gaulard, en 1890, à Lanzo même, théâtre de son succès officiel (fig. 2). Mais cet inventeur de génie devait décidément connaître, même après sa mort, la plus étrange fortune ; M. R.-V. Picou, également fondateur de la Société internationale des Electriciens, l'un des plus méritants pionniers de l'électrotechnique française, que son grand âge a empêché de venir apporter lui-même son témoignage, a bien voulu nous adresser la lettre suivante :

A l'époque lointaine (1898-1899) où je présidais la Société internationale des Electriciens, je reçus un jour la visite d'une dame âgée, très distinguée, qui était, je crois, veuve d'un notaire parisien. Son nom n'importe pas. Cette dame me posa à brûle-pourpoint la question imprévue : « Monsieur, croyez-vous au spiritisme ? »

Avant que j'aie eu le temps de trouver une réponse diplomatique, elle ajouta :

« J'en suis une adepte, et comme telle, j'ai connu Lucien Gaulard. Or, dernièrement, j'ai été en communication avec lui ; et il se plaignait de l'abandon dans lequel on laissait sa dépouille mortelle. C'est pour vous faire part de cet état de choses que je viens vous trouver. »

Elle me dit ensuite que Gaulard était mort très pauvre sans parenté proche. Il avait été inhumé dans une concession temporaire dont le terme était prochain, etc.

Je répondis à cette dame que mes idées sur le spiritisme n'avaient aucune importance, mais que j'en attachais beaucoup à l'abandon qu'elle me faisait connaître, ce dont je la remerciais ; et, enfin, qu'elle pouvait compter que je ferais le nécessaire pour y remédier.

Personnellement, j'avais très peu connu Gaulard ; je ne l'avais vu que deux ou trois fois. Mais je pensais que ses efforts malheureux méritaient que les électriciens lui assurassent au moins une sépulture décente. Je provoquai donc parmi les membres de la Société internationale des Electriciens l'ouverture d'une souscription qui réunit rapidement la somme nécessaire pour permettre l'achat d'un terrain et la construction du très simple monument où il repose au cimetière de Montmartre.

Quel émouvant roman que la vie de Lucien Gaulard ! Malheureusement, ce fut en fait une existence des plus tragiques...

Quand ils visiteront les installations grandioses de la Truyère, de Kembs, avec leurs transformateurs

gigantesques, ceux qui auront bien voulu lire l'histoire de ce grand précurseur ne pourront se défendre d'un profond sentiment de révolte contre l'injustice de la destinée.

J. BETHENOD.

Annexes

I. Extrait du rapport du 23 janvier 1907 de M. P. Chautard, conseiller municipal.

Attribution du nom de Lucien Gaulard à une rue du dix-huitième arrondissement sur l'initiative de Mme Ruelle-Gaulard.

BIOGRAPHIE. — GAULARD, ingénieur français (1850-1888), inventeur du transport de la lumière électrique à grande distance, sans déperdition de force. Invention féconde en applications. Un monument lui a été élevé à Lanzo (Italie).

II. Note nécrologique par Galileo Ferraris ²¹.

Lucien GAULARD est mort le 26 novembre 1888 à l'Hospice de Sainte-Anne, à Paris. L'initiateur de la distribution d'énergie électrique à grande distance, au moyen de transformateurs à courant alternatif, celui qui a prévu et démontré le premier toute l'importance du courant alternatif et des transformateurs, est mort à l'âge de trente-huit ans seulement, après une année de maladie cruelle, au milieu des désillusions et du découragement, au moment où les idées dont il avait été l'apôtre prenaient un développement immense et une importance industrielle illimitée.

Génie singulièrement hardi et entreprenant, il était encore jeune et s'était fait connaître par des recherches auxquelles il avait consacré quelques années, dans la

fabrication d'explosifs et dans la construction de quelques appareils électriques présentés par lui à l'Exposition internationale de l'Electricité de Paris en 1881. Mais son œuvre principale, celle qui a marqué d'une manière indélébile son nom dans l'histoire des applications électrotechniques, celle qui a consommé trop tôt et d'une manière déplorable les dernières années de sa brève et anxieuse vie, est celle qui est relative aux transformateurs à courant alternatif.

La première application de son idée fut tentée par lui à Londres en 1882, avec des appareils primitifs et incapables de donner un assez bon rendement industriel ; mais après deux années seulement, en 1884, il présentait au public des appareils améliorés et il réussissait à les faire fonctionner de manière à obtenir un rendement tout ce qu'il y avait de plus élevé, imprévu. Ces appareils furent présentés par lui pour la première fois, dans la section internationale d'électricité de l'Exposition générale italienne de Turin et ils auraient suffi à eux seuls à donner à notre Exposition une très grande importance. De fait, l'Exposition de Turin doit à Gaulard d'avoir marqué une date importante dans l'histoire des applications de l'électricité.

Les appareils de Gaulard, présentés à l'Exposition de Turin de 1884 sous le nom de « générateurs secondaires » sont connus des lecteurs de l'« *Ingegneria civile e le Arti industriali* » et il en est de même des expériences qui furent faites à Turin par Gaulard lui-même, par les membres du jury international et par d'autres. Ces expériences montrèrent nettement la parfaite possibilité d'appliquer le principe sur lequel repose le nouveau mode de distribution, et elles venaient corroborer l'opinion que les appareils transformateurs pouvaient présenter des rendements égaux ou même supérieurs à 90 pour 100, réalisant finalement un premier exemple d'éclairage à grande distance. Avec les machines installées dans les locaux de l'Exposition, il était possible d'alimenter avec un

assez bon rendement des lampes électriques de différents modèles installées dans la gare de Lanzo à la distance de 34 km, par un circuit de 80 km environ de fil de cuivre de 4 mm de diamètre.

L'idée n'était pas nouvelle et ne pouvait du reste pas l'être, mais le fait d'arriver à son heure, le courage de d'entreprise, le mérite de la réussite appartenaient sans nul doute à Gaulard.

Et si les générateurs secondaires présentés par le hardi inventeur étaient encore susceptibles de notables et importants perfectionnements qui furent réalisés ensuite par d'autres, cela ne réduit pas le mérite de l'inventeur ni l'importance de ses expériences. Le jury international conféra à Gaulard, à juste raison, à titre d'encouragement, les deux tiers de la grande prime de 15 000 lire constituée par le gouvernement et la Ville de Turin.

C'est une fatalité que Gaulard, qui avait obligé le monde électrique entier à reconnaître l'immense importance des transformateurs à courant alternatif, ait rencontré ensuite des difficultés de réalisation pratique et ait perdu du temps et subi la douloureuse humiliation de devoir s'arrêter pendant que d'autres avançaient rapidement et triomphalement sur le chemin qu'il avait tracé le premier. Alors le découragement, les difficultés matérielles et financières finirent par mettre le pauvre inventeur dans un état de surexcitation mentale, qui le conduisit à l'asile d'aliénés et une année après, à la tombe.

Finalement, le brevet de Gaulard fut déclaré déchu. Mais si, aujourd'hui, nous voyons la multiplication et la diffusion de la distribution d'électricité par le moyen des transformateurs et des courants alternatifs, en Amérique par les Sociétés Westinghouse et Thomson-Houston, en Angleterre par la Société Ferranti, en Europe continentale par la Maison Ganz, transformer et utiliser des milliers et des milliers de chevaux-vapeur, nous, sans vouloir réduire le mérite des autres inventeurs et continueurs, nous ne

pouvons nous empêcher de nous reporter avec une immense satisfaction à notre Exposition de Turin où furent faites les premières expériences et de déposer avec un sincère regret et une gratitude éternelle, une couronne sur la tombe de Lucien Gaulard qui a eu et a répandu à partir de ce moment la foi dans le succès.

(Traduit par M. H. ROZE de « Opere de Galileo Ferraris », page 471.)

III. Extrait du compte rendu de la réunion mensuelle du mercredi 1^{er} février 1899 de la Société internationale des Electriciens ²².

Présidence de M. R.-V. Picou.

M. LE PRÉSIDENT. — « Beaucoup d'entre nous ont conservé un souvenir personnel de notre collègue Lucien Gaulard ; tous nous avons présents dans la mémoire ses travaux et sa contribution indiscutable à la création du transformateur industriel.

» Lucien Gaulard est mort, voici dix ans déjà, dans une situation matérielle et morale des plus tristes. Ses modestes ressources dévorées par la maladie, sa famille s'est trouvée dans l'impossibilité de lui assurer un asile définitif et ses restes ont été inhumés dans une concession provisoire qui est à la veille d'expirer.

» Votre président, mis au courant de cette situation, a pensé qu'il était du devoir des électriciens français de recueillir cet héritage et d'élever à Lucien Gaulard un monument où son nom serait perpétué, et où ses cendres reposeraient éternellement.

» La Société internationale des Electriciens ne pouvait malheureusement pas intervenir officiellement ; ses statuts

ne le lui permettent pas ; mais quelques-uns de ses membres, agissant individuellement, se sont réunis en comité pour assurer cette œuvre. M. Eug. Sartiaux a bien voulu en accepter la présidence, et l'a exercée avec le dévouement et l'activité que nous lui connaissons. Des concours généreux, tels que ceux du Syndicat des Industries électriques, du Syndicat des Usines d'Electricité, de la Chambre syndicale des Entrepreneurs et Constructeurs électriciens, de la Société amicale des Ingénieurs électriciens, de la Société des Ingénieurs civils, nous ont, dès l'abord, donné la certitude de réunir, en tous cas, la somme suffisante pour l'acquisition d'un terrain. De nombreuses souscriptions individuelles sont venues ensuite ; mais, les membres de la société n'ayant pas été avisés directement jusqu'ici, j'ai cru devoir le faire ici, afin qu'aucun de ceux qui ont le désir de contribuer à cette œuvre n'en soit empêché par ignorance.

» De la somme totale recueillie dépendront l'importance et la nature du monument, auquel, tout en lui conservant les justes proportions, nous désirons donner le plus grand caractère de durabilité.

» Les souscriptions doivent être envoyées à M. Eug. Sartiaux, 48, rue de Dunkerque, à Paris. »

IV. Informations : Souscription pour le monument L. Gaulard ²³.

M. E. Sartiaux, président du comité qui s'était chargé de réunir les souscriptions pour élever un monument à la mémoire de L. Gaulard, nous a fait parvenir la liste des souscripteurs, trop longue pour que nous puissions l'insérer in extenso. Le total des sommes recueillies s'élève à 2 560 fr. Le but poursuivi est donc atteint et tous nos

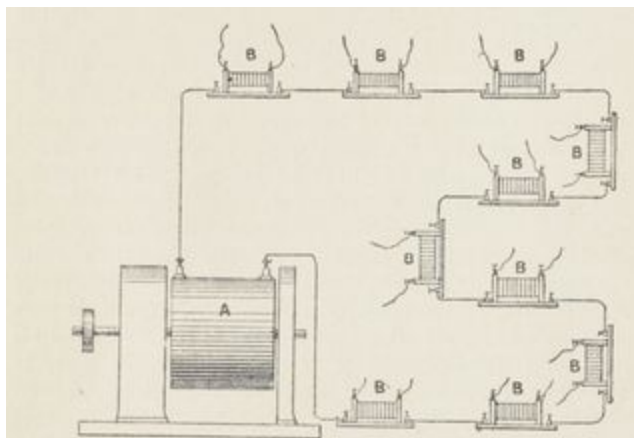
remerciements sont adressés à la fois aux membres du comité et aux généreux souscripteurs.

V. Nouveau système de distribution de l'électricité pour servir à la production de la lumière et de la force motrice, par MM. L. Gaulard et J.-D. Gibbs, de Londres.

Voici le texte du résumé du brevet d'invention n° 151 458 de L. Gaulard et J.-D. Gibbs, tel qu'il a été publié dans « La Lumière électrique » ²⁴ sous le titre indiqué ci-dessus.

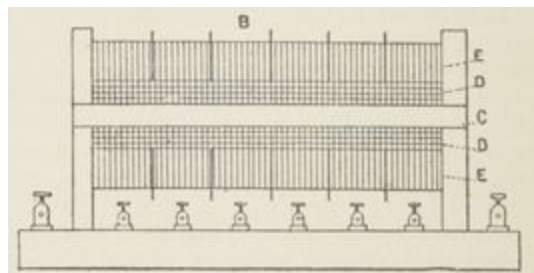
Paris, 7 octobre 1882. — Ce système repose sur l'emploi d'un courant alternatif engendré par une machine dynamoélectrique quelconque et déterminant par son passage à travers un nombre illimité de bobines d'induction de construction spéciale la naissance de courants induits dont la qualité et la valeur ne dépendent que de la construction de ces bobines. Les courants engendrés dans ces conditions seront utilisés soit par des lampes pour produire la lumière, soit par des machines dynamo pour produire la force motrice.

Fig.3. — Schéma de la disposition des générateurs secondaires B sur le circuit alimenté par le générateur à courants alternatifs A.



MM. L. Gaulard et J.-D. Gibbs prennent une machine à courants alternatifs A (fig. 3), construite de telle sorte que la résistance de l'induit soit supérieure à celle du circuit extérieur reliant les deux extrémités ; supposons la longueur de ce circuit extérieur égale à 50 km ; ils placent sur ce circuit, tous les 500 m, par exemple, un générateur secondaire B construit de la façon suivante : sur un noyau surexcitateur en fils de fer doux C est enroulé un fil de cuivre d'environ 0,003 de diamètre et parfaitement isolé, en trois rangées de spires superposées D (fig. 4). Sur le cylindre ainsi formé viennent se placer des bobines E, sur lesquelles est enroulé un câble de 6 fils de cuivre de 1/2 mm de diamètre et individuellement isolés à l'aide de coton paraffiné. Les extrémités du câble de chaque bobine sont rattachées à des bornes permettant leur groupement en quantité et en tension. Ces bobines E constituent l'induit, aux pôles duquel les appareils de consommation sont reliés. Le premier fil D, au contraire, à travers lequel circule le courant initial, constitue l'inducteur. Or, le courant primaire, en passant à travers l'inducteur D, ne subit d'autre modification que celle que lui impose la résistance de cet inducteur. Donc, les courants engendrés sur les 100 générateurs secondaires B placés sur le circuit n'auront altéré la valeur du courant primaire que dans la proportion de la somme des résistances de leur inducteur D, résistance qui sera compensée par la construction de l'induit du générateur primaire A.

Fig. 4. — Croquis du générateur secondaire et de la disposition des bobines qui le constituent.



Dans ces conditions, les inventeurs prétendent que le nombre des générateurs secondaires B peut être multiplié indéfiniment sur le circuit, et que la valeur des courants engendrés ne dépendra (le courant initial alternatif restant constant) que de la construction des induits des générateurs secondaires 25.

A propos du cinquantenaire des expériences de Creil

L'état actuel de la technique des réseaux de transmission d'énergie électrique

I. Introduction. — Le 26 octobre 1885, Marcel Deprez annonçait à l'Académie des Sciences qu'il avait réussi à transporter par une ligne de 112 km de longueur une puissance de 40 ch, grâce à une dynamo développant à ses bornes une tension de 6000 v.

Cinquante ans plus tard, en cette année de 1935, la puissance des usines productrices d'énergie électrique installées dans le monde dépasse 80 millions de kilowatts et ces usines produisent annuellement plus de 200 milliards de kilowatts-heures. Des lignes aériennes à 280 kv vont être mises en service en Californie ; nous posons, en France, un câble souterrain qui fonctionnera sous 220 kv et dont la capacité de transport atteindra 200000 kw.

Nous ne pousserons pas plus loin cette comparaison chiffrée ; elle suffit déjà à mesurer l'étape parcourue en un demi-siècle dans le domaine des transmissions d'énergie, étape qui fait l'honneur de toute une génération d'ingénieurs.

Nous regrettons personnellement que l'un de ceux dont la carrière a débuté à l'époque des expériences de Creil, et qui, grâce à Dieu, sont encore nombreux parmi nous, n'ait pas encore entrepris d'écrire l'histoire détaillée de cette évolution dont beaucoup d'épisodes intéressants risquent de sombrer dans l'oubli.

Du seul point de vue de la philosophie humaine, l'histoire des premières années de recherches mériterait certainement d'être relatée en détail : c'est la période où, dans une région de la technique encore en friche, quelques hommes d'élite se sont jetés à corps perdu à la poursuite des inventions, jouant entre eux une sorte de match où l'émulation stimulait les efforts plus encore peut-être que le simple plaisir de la découverte.

Dans le domaine qui nous occupe, l'ère de ces grandes découvertes paraît être close, et les amateurs d'inventions retentissantes ont dû diriger leur activité dans d'autres voies. Mais est-ce à dire que l'outil que nos devanciers nous ont remis ait atteint un tel degré de perfection que l'ingéniosité des hommes n'y puisse plus rien apporter

Il nous semble bien au contraire que la situation à laquelle nous avons à faire face évolue chaque jour, et que, chaque jour, elle pose de nouveaux problèmes. L'accroissement continu du nombre de laboratoires destinés aux recherches électrotechniques et de celui des chercheurs qui y consacrent leur activité paraît en être une preuve irréfutable. Certes, le rôle de ces chercheurs restera plus impersonnel et plus obscur que celui des grands pionniers à qui revient l'honneur d'avoir mis en évidence les principes fondamentaux ; mais si modestes que soient ces travaux, l'expérience quotidienne démontre l'intérêt de les poursuivre sans relâche.

Où en est donc cette technique des transmissions d'énergie née voici cinquante ans ? Quels sont les perfectionnements qu'elle nécessite encore et quel est le programme des travaux qu'il importe de poursuivre dans un avenir immédiat ?

Le cinquantenaire des expériences exécutées par Marcel Deprez, entre Paris et Creil, paraît être l'occasion de nous poser ces utiles questions, et le but de cet article est d'y répondre succinctement, dans la mesure du possible.

Pour mettre un peu d'ordre dans cet exposé, nous nous proposons de discuter en premier lieu les conditions générales de fonctionnement de nos réseaux de transmission, d'examiner ensuite le matériel qui se trouve utilisé dans ces réseaux et de terminer enfin par un examen sommaire de leur mode d'exploitation.

Mais avant d'aborder ces détails techniques, il nous paraît indispensable de dire quelques mots au sujet de l'évolution générale des conditions d'emploi de l'énergie électrique par la clientèle des réseaux, car c'est en fin de compte cette évolution qui domine tout entière la technique des transmissions.

II. Situation générale de l'industrie du transport et de la distribution de l'énergie électrique, face aux besoins actuels de sa clientèle. — On a dit que toute l'action matérielle de l'homme consiste, d'une part, à transformer l'énergie qu'il trouve dans le monde afin de l'adapter à ses besoins, d'autre part, à conserver cette énergie pour l'avoir à sa disposition au moment voulu, et enfin à la transporter pour en disposer à l'endroit voulu. Or, si l'on envisage l'énergie sous la forme électrique, on doit avouer que cette proposition se trouve en défaut au moins en ce qui concerne le second point. L'énergie électrique se transforme et se transmet sans doute avec une extrême facilité, mais on n'a pas trouvé, jusqu'ici, le moyen de l'accumuler en quantité suffisante sous une forme pratique. On nous objectera peut-être que l'accumulateur électrique est précisément destiné à remplir cette fonction, mais on voudra bien nous concéder que cet appareil, qui n'a fait l'objet que de perfectionnements de détail depuis son invention par Gaston Planté, ne peut être utilisé que dans des cas très particuliers ; il n'est pas, dans l'état actuel des choses, susceptible de concurrencer d'autres accumulateurs d'énergie : la voiture automobile à accumulateurs, par exemple, ne peut actuellement

remplacer l'engin léger et rapide qui transporte son énergie sous forme de carburant dans un réservoir de faibles dimensions.

L'énergie électrique doit donc être produite au moment même où elle est consommée, et tout le problème qui nous occupe est dominé par le fait que les usines de production et les éléments de transport et de distribution doivent se plier à chaque instant aux désirs de la clientèle des réseaux. Or, les exigences de cette clientèle sont devenues singulièrement tyranniques.

Il y a seulement quelques dizaines d'années, l'utilisation de l'énergie électrique semblait réservée à quelques privilégiés, comme un luxe nouveau mis à leur disposition et destiné à accroître leur confort. L'éclairage a été longtemps la principale application envisagée, le fait que notre principal journal électrotechnique se soit appelé « La Lumière électrique » et « L'Eclairage électrique » en est une preuve suffisante. Mais, petit à petit, l'emploi de l'énergie électrique s'est étendu aux usages industriels, puis au fonctionnement des services publics, et finalement à la commande de tous les rouages de l'activité humaine.

L'industrie de la distribution d'énergie, qui a pu être considérée, il fut un temps, comme une industrie de luxe, est devenue progressivement un auxiliaire essentiel de la vie des individus et des collectivités. La « panne » survenue à l'installation de Marcel Deprez, en 1885, n'avait eu pour conséquence que de déranger inutilement les membres de l'Institut, solennellement invités à assister au fonctionnement du premier transport de force. Quelques années plus tard, un incident de ce genre contraignait seulement quelques heureux de ce monde à reprendre la lampe à pétrole abandonnée depuis peu, et il restait même sensiblement inaperçu s'il survenait dans le courant de la journée. En 1935, un arrêt général de la distribution d'énergie dans une grande ville des Etats-Unis d'Amérique, et même dans nos capitales d'Europe où le machinisme n'a

cependant pas encore pris les mêmes proportions qu'à New-York ou à Chicago, est considéré comme une calamité publique, car il paralyse d'un seul coup toute la vie de la cité. L'énergie électrique a conquis le monde moderne, et celui-ci ne sait plus s'en passer : cette énergie, pratiquement impossible à approvisionner près de son consommateur, doit lui être livrée à son gré, en tout temps, sans défaillance.

La nécessité de la continuité de la distribution, impérieuse dans les grandes villes, n'est peut-être pas encore profondément ressentie dans certains réseaux provinciaux ni surtout dans les régions rurales, mais qu'on ne s'y fie pas : l'usage de la cuisine électrique s'est déjà répandu dans certaines campagnes, en Hollande tout particulièrement ; lentement mais progressivement, le fermier acquiert l'habitude d'utiliser l'énergie électrique pour exploiter sa ferme ; il sera certainement bientôt interdit aux distributeurs d'énergie de condamner la population d'un village à se contenter d'un repas froid sous prétexte qu'un orage est survenu dans la région, ou d'arrêter les travaux du fermier et de l'artisan sous prétexte d'une défaillance du matériel de transmission et de distribution.

La tyrannie du consommateur se manifeste d'ailleurs de bien d'autres manières, si l'on considère ses exigences toujours croissantes relatives à la qualité de la marchandise que constitue en fin de compte cette énergie. Depuis longtemps, il demande que la tension sous laquelle elle est distribuée soit constante ; depuis hier il veut pouvoir régler ses horloges d'après la fréquence du courant ; aujourd'hui il proteste quand les lignes à haute tension édifiées pour le satisfaire troublent son poste de radiodiffusion. Ajoutons à tout cela son désir bien humain d'obtenir cette énergie à bon compte, et on conviendra que nous n'avons rien exagéré en le qualifiant de tyran.

La dernière exigence, celle relative au prix de l'énergie, soulève d'ailleurs, vis-à-vis des autres, une contradiction que ni le grand public ni même des personnes averties n'estiment comme il sied, et il n'est peut-être pas inutile de souligner le rôle que joue cette nécessité croissante d'un « bon service » dans le prix de revient de l'énergie.

Pour fixer les idées nous considérerons l'exemple d'une installation destinée à transmettre 175000 kw à une distance de 500 km. Dans les conditions actuelles de l'industrie, le prix du matériel strictement indispensable pour réaliser ce transport (comprenant uniquement les transformateurs et la ligne) ne dépasserait pas 80 millions de francs, et si cette installation était utilisée pendant les 8700 heures de l'année, les charges de capital grevant chaque kilowatt-heure transmis n'excéderaient pas 0,005 fr. Un premier fait bien connu vient modifier ce bilan, c'est que la moyenne des consommateurs n'utilise cette ligne que pendant un tiers du temps de sorte que nos charges de capital doivent déjà être multipliées par 3 ²⁶. Mais toutes ces estimations présupposent que l'on a seulement installé le matériel strictement indispensable ; or, puisqu'il est nécessaire d'assurer la continuité du service envers et contre tout, l'installation ainsi définie est absolument insuffisante. Pour que le transport soit stable, pour qu'en cas d'avarie ses éléments défectueux s'éliminent sans répercussion grave, en un mot pour que son exploitation continue soit possible, il faut non seulement doubler les lignes et augmenter le nombre de transformateurs, mais aussi multiplier le nombre des postes intermédiaires et toutes sortes d'installations auxiliaires destinées à la sécurité et aux réglages ; de ce fait, le capital à investir dans cette installation dépasse en réalité 250 millions de francs, et la charge de ce capital doit être encore majorée des salaires du personnel chargé de l'exploitation et de l'entretien de ces installations. Le prix du transport d'un

kilowatt-heure entre les deux extrémités de notre système à haute tension dépasse ainsi largement 0,05 fr et on peut dire que, toutes choses égales d'ailleurs, les trois quarts au moins de ces frais de transport sont imputables à la nécessité d'assurer la continuité du service.

On s'est souvent insurgé contre le fait que, dans les conditions présentes, il soit plus coûteux de transmettre l'énergie électrique produite sur le carreau des mines que de transporter à la même distance le charbon nécessaire à la production de cette énergie. Il nous semble que la raison profonde de ce paradoxe réside précisément dans l'impossibilité d'accumuler l'énergie électrique près de son point de livraison, et dans la nécessité d'assurer sa distribution sans défaillance. Le train qui transporte le charbon de la mine vers l'usine génératrice thermique lointaine peut stopper devant un signal ou sur une voie de garage, tandis que le réseau de transmission d'énergie n'a pas droit au moindre arrêt ; l'énergie que transporte le train est stockée à son arrivée dans le parc de l'usine et certaines irrégularités dans sa livraison sont sans importance pour celui qui l'utilise, tandis que l'énergie que transmet la ligne à haute tension doit être utilisée à l'instant où elle est produite, et son destinataire n'entend pas en être privé un seul instant.

Nous nous excusons de cette longue digression qui nous a menés assez loin de notre sujet principal, mais nous désirions bien souligner l'utilité et le but des perfectionnements qu'il faut apporter chaque jour à la technique de la transmission et de la distribution d'énergie. Ce but est, en fin de compte, de toujours améliorer la qualité du service sans qu'il en résulte de charge nouvelle pour le consommateur : pour y parvenir, il faut constamment améliorer la qualité du matériel et les procédés d'exploitation, et compenser les frais qu'entraînent ces améliorations par une diminution des

frais de production de l'énergie, et par un accroissement des rendements.

III. Conditions générales de fonctionnement des réseaux de transport et de distribution. — 1. COURANT ALTERNATIF OU COURANT CONTINU ? — Le premier transport de force, dont on fête cette année le cinquantenaire, était réalisé en courant continu, et il semblait à beaucoup, il y a cinquante ans, que l'avenir appartenait à cette forme de courant. Or, si l'on met à part le cas très spécial des réseaux destinés à la traction électrique, on doit constater que la distribution de l'énergie est actuellement presque universellement réalisée sous forme de courants alternatifs polyphasés à tension constante. Ce mode de distribution s'est imposé de lui-même par ses multiples avantages, tels que son adaptation immédiate aux installations d'éclairage, la facilité de transformation de la tension, et l'emploi de moteurs électriques économiques et d'un entretien facile. On trouve bien encore, dans certaines villes, quelques réseaux à courant continu venus au monde avant la naissance des moteurs à induction, et parfois même des zones alimentées en courant alternatif monophasé ; mais si certains de ces réseaux se développent encore sur place par suite d'une situation de fait et à cause des dépenses prohibitives qu'entraînerait leur transformation, l'extension de ce mode de distribution hors des secteurs où ils sont nés est actuellement arrêtée. Il semble donc que l'on soit parvenu, du côté de la distribution, à un système présentant la plupart des qualités requises et rien ne fait encore prévoir que l'on puisse lui substituer un dispositif plus avantageux.

Le problème de la transmission d'énergie à distance se présente à cet égard sous un aspect un peu différent, en ce sens que si les systèmes triphasés à tension constante sont presque exclusivement utilisés aujourd'hui, leurs avantages sont encore assez souvent discutés. Sans quitter

le domaine du courant alternatif, on a proposé plusieurs systèmes qui conduiraient à abandonner le principe de la tension constante pour utiliser plus directement les caractéristiques naturelles des longues lignes. L'énumération même succincte des différents avantages et inconvénients que présentent ces systèmes nous entraînerait trop loin : elle a d'ailleurs été faite à maintes reprises. Mais l'emploi du courant alternatif lui-même est aujourd'hui remis en question : grâce aux récents développements des soupapes ioniques à grilles commandées, il est maintenant possible de transformer le courant continu en courant alternatif et vice versa, de sorte que, sans rien changer au matériel des usines génératrices et des postes de transformation, il devient possible de substituer le courant continu au courant alternatif le long des lignes de transmission d'énergie.

Or, le courant continu à haute tension présente de multiples avantages dont le principal réside probablement dans la manière toute différente dont se comportent les diélectriques sous l'effet d'une tension continue ou d'une tension alternative. Les diélectriques hétérogènes, constitués par les isolateurs des lignes aériennes et surtout par le papier imprégné d'huile des câbles souterrains, résistent indéfiniment à des contraintes continues voisines de leur point de rupture, tandis qu'ils cèdent plus ou moins rapidement sous l'effet de tensions alternatives beaucoup plus faibles. De nombreuses expériences ont montré par exemple que la rigidité diélectrique du papier imprégné d'huile permet de lui imposer des contraintes continues de 20 à 30 kv : mm, mais que, pour des câbles travaillant sous tension alternative sinusoïdale, il est imprudent de dépasser en service normal un gradient de 10 kv : mm. Sans aucun aménagement supplémentaire et sans diminution du rendement, nos lignes aériennes actuelles pourraient voir leur capacité de transport majorée de 40 pour 100. D'autre part, dans l'état actuel de la technique

des câbles, il serait possible de réaliser des canalisations souterraines en courant continu pour des tensions pouvant atteindre 1 million de volts entre conducteurs, et le prix de revient de ces câbles ne dépasserait guère, à capacités de transport égales, celui des lignes aériennes triphasées : or, les avantages de telles lignes souterraines, à l'abri des actions de la foudre, des tempêtes, du verglas et des chocs d'avions, sont incontestables.

Sommes-nous donc à la veille d'une révolution dans le domaine des transmissions d'énergie ? L'avenir, comme on dit, appartient-il au courant continu ?

Si nous nous laissions tenter à de faciles anticipations, consistant par exemple à décrire ce que pourra être notre industrie lorsque nos enfants ou nos petits-enfants fêteront le centenaire des expériences de Creil, nous aurions très probablement répondu par l'affirmative à ces questions. Nos prétentions étant à la fois plus modestes et plus objectives, nous préférons faire preuve de moins d'enthousiasme et dire que nous ne croyons pas à la réalisation immédiate de cette révolution.

D'abord, les nouveaux appareils de transformation statiques, les onduleurs pour les appeler par leur nom, sont encore des instruments bien imparfaits qui ont à peine franchi les portes des laboratoires. En appliquant à leurs bornes d'entrée une tension continue, on obtient bien à leurs bornes de sortie une tension qui passe rythmiquement par des maxima positifs et négatifs, mais on conviendra qu'il y a encore un grand pas à franchir jusqu'à ce que les onduleurs se plient aux exigences que nous formulons vis-à-vis de nos constructeurs d'alternateurs pour que leurs machines fournissent des courants sinusoïdaux.

D'autre part, les inventeurs se glorifient, à juste titre d'ailleurs, du fait que leurs onduleurs sont capables de fournir quelques centaines, voire quelques milliers de kilowatts. Or, pour nos transmissions d'énergie, ce sont des

dizaines et même des centaines de milliers de kilowatts dont nous avons besoin. Et puis, quand ces appareils seront réellement au point, c'est toute la technique des transmissions proprement dites qu'il faudra refondre ; il faudra développer de nouveaux procédés de mesure et de comptage, de nouveaux systèmes de relais, de nouveaux appareils d'interruption et de sécurité. Des problèmes inattendus surgiront, dont il faudra patiemment rechercher la solution : quel sera par exemple l'effet d'une avarie sur un réseau de câbles souterrains étendu, alors qu'un seul câble de 300 km de longueur soumis à la tension de 500 kv, libère en se déchargeant 7,5 millions de joules, soit à peu près autant qu'un kilogramme de nitroglycérine ? Comment coupera-t-on sous ces hautes tensions un courant qui n'a pas le mérite comme notre courant alternatif, de s'annuler spontanément cent fois par seconde ?

La mise au point de toutes ces questions demandera encore beaucoup d'efforts et nos réseaux triphasés ont le temps de se développer et de se perfectionner avant de céder définitivement le pas à des systèmes profondément différents.

D'ailleurs, toutes les discussions sur les avantages et les inconvénients respectifs des différents systèmes de transmission ne méritent peut-être pas tout l'intérêt qu'on leur prête si l'on considère que la distinction que nous venons de faire nous-mêmes entre les réseaux de distribution et les réseaux de transmission se révèle chaque jour plus arbitraire. Cette distinction avait sa raison d'être à l'époque encore peu lointaine où la consommation d'énergie électrique était consacrée à quelques agglomérations privilégiées, et où l'on songeait à alimenter ces centres de consommation au moyen de sources d'énergie éloignées de plusieurs centaines de kilomètres, par des lignes directes, n'ayant aucune raison de trouver en cours de route d'autres centres de consommation importants.

Mais le développement des usines d'électrochimie, l'électrification des chemins de fer, la construction des réseaux ruraux, etc., ont considérablement modifié les données du problème en disséminant sur toute la surface des pays civilisés les centres de consommation : il paraît aujourd'hui définitivement acquis qu'au moins dans les pays de l'Europe occidentale une ligne de transmission d'énergie ne sera que très exceptionnellement réalisée en une seule artère homogène n'ayant de liaison à des usines ou des sous-stations qu'à ses deux extrémités. Il n'y a pas de solution de continuité entre ces lignes de transmission et les lignes de distribution, et le système triphasé à tension constante s'étant imposé de lui-même pour les besoins de la distribution, il paraît difficile de marquer la frontière où il devra laisser place à d'autres systèmes.

Cette justification sommaire de la forme de courant actuellement adoptée dans nos réseaux n'a pas pour but de masquer les difficultés qu'elle soulève et les inconvénients qu'elle peut présenter.

Un premier inconvénient des courants alternatifs réside dans la difficulté de construire à leur usage des moteurs à vitesse variable. La machine à collecteur reste, en dépit des multiples recherches dont il a fait l'objet, un engin de rendement relativement médiocre et de prix trop élevé, et l'on n'a malheureusement pas l'impression qu'il soit très sensiblement perfectible. Peut-être les redresseurs à grilles commandées, qui ont déjà permis la réalisation de machines dites sans collecteur, permettront-ils dans un proche avenir de lever cette difficulté.

Un autre inconvénient provient de la puissance réactive absorbée par les abonnés et par les réseaux de distribution : dans les grands centres où l'énergie est utilisée en majeure partie pour la force motrice, il n'est pas rare d'être obligé de fournir plus de puissance réactive que de puissance active, ce qui nécessite l'installation de canalisations et d'appareils de transformation de

dimensions beaucoup plus grandes qu'il ne serait nécessaire : cette puissance réactive ne peut pas être transmise à grande distance en quantité arbitraire sans entraîner des chutes de tension inadmissibles et des pertes de rendement très importantes, et elle est souvent considérée comme une tare inhérente à l'emploi des courants alternatifs. En réalité, cette tare est attachée au réseau de distribution proprement dit, et elle est due, la plupart du temps, à une tarification imprévoyante qui a laissé se développer dans la clientèle l'emploi inconsideré d'appareils empruntant systématiquement leur puissance magnétisante au réseau : que l'énergie soit transmise à distance par des lignes à courant continu ou par des courants alternatifs, il sera toujours nécessaire d'engendrer sur place, près des centres de distribution, la puissance réactive absorbée par les réseaux de distribution à courant alternatif ; on aboutit même à cette conclusion apparemment paradoxale que la transmission de l'énergie en courant continu, pour alimenter des réseaux de distribution à courant alternatif, conduira, dans de nombreux cas, à installer des organes de compensation de la puissance réactive plus importants que si la transmission était réalisée elle-même en courant alternatif.

C'est que, si les éléments d'un transport de force à courant alternatif absorbent de la puissance réactive, les lignes aériennes et souterraines, par le jeu des courants de capacité, en fournissent spontanément ; si la tension de transmission est judicieusement choisie, on peut faire en sorte non seulement que les puissances inductive et de capacité de la ligne se compensent, mais encore que la puissance de capacité prédomine et contribue à compenser, au moins en partie, la puissance réactive absorbée par les réseaux de distribution.

On peut d'ailleurs espérer que, dans un avenir peu éloigné, on parviendra à réaliser des condensateurs statiques suffisamment économiques pour que leur emploi

se généralise dans les réseaux. Lorsque cette nouvelle étape sera franchie, lorsqu'on pourra envisager couramment le branchement de ces condensateurs non seulement en dérivation sur les lignes, mais encore en série dans celles-ci, la technique des transmissions d'énergie en courant alternatif aura fait un nouveau pas décisif en avant.

On a critiqué aussi le choix de la fréquence de 50 p : s normalisée en Europe, et mis en évidence ses inconvénients. On a signalé que cette fréquence ne correspond plus à l'utilisation optimum des matériaux magnétiques modernes ; une fréquence plus élevée permettrait de réduire le poids et le prix des machines et des transformateurs, et de mieux adapter la vitesse maximum de rotation des alternateurs à celle des turbines à vapeur à haut rendement. On peut à cet égard citer comme exemple le cas de la transmission d'énergie à bord du paquebot « Normandie » : n'ayant été retenus dans ce cas par aucune situation de fait ni par aucune contingence, les ingénieurs ont été conduits à adopter la fréquence de 80 p : s pour utiliser au mieux les matériaux dont ils disposaient.

Il ne saurait être question, bien entendu, de modifier la fréquence de nos réseaux : ceux qui, ces dernières années, ont eu pour tâche d'unifier à 50 p : s les fréquences autrefois très disparates savent quelles sont les difficultés d'une pareille entreprise ; le bénéfice à en tirer ne justifierait certainement pas les dépenses qu'elle comporterait. Mais on est en droit de se demander si, dans un avenir plus ou moins rapproché, les soupapes ioniques fonctionnant en changeurs de fréquence statiques ne permettront pas d'envisager cette question sous un tout autre aspect.

Un dernier problème inhérent à l'emploi des courants alternatifs est celui de la stabilité de marche en parallèle des usines génératrices séparées par des lignes plus ou moins longues, surtout en régime troublé. C'est une

question qui a beaucoup inquiété les techniciens au cours de la dernière décade, et qui a suscité, en particulier aux Etats-Unis d'Amérique, un très grand nombre de remarquables travaux. Cette inquiétude s'est manifestée à la suite de plusieurs incidents survenus dans de grands réseaux interconnectés, les conséquences et les répercussions de ces incidents devenant d'autant plus graves qu'ils intéressent des artères de transmission plus importantes et des réseaux plus étendus. L'importance de ce problème paraît d'ailleurs dès à présent bien diminuée grâce à certaines solutions déjà développées, par exemple, grâce à l'emploi de relais et d'interrupteurs à action très rapide. Mais il n'est pas douteux que le sujet soit loin d'être épuisé, et que, dans ce domaine particulier, la sagacité des chercheurs puisse encore longtemps et utilement s'exercer.

2. THÉORIE ET CALCUL DES RÉSEAUX. — Je ne m'étendrai pas longuement sur les problèmes d'ordre purement théorique soulevés par le calcul électrique des réseaux.

En ce qui concerne les régimes stationnaires équilibrés, des travaux datant de plus de trente ans nous ont dotés d'un outillage très complet, d'ailleurs souvent utilement perfectionné par la suite. Mais si les publications relatives au calcul des lignes sont à l'heure actuelle si nombreuses encore, c'est qu'il existe une infinité de manières de résoudre un même problème suivant la forme que l'on préfère donner aux variables et aux paramètres, suivant les simplifications que l'on juge utile d'y apporter, suivant que l'on préfère l'algèbre ou la géométrie : il s'agit là, maintenant, de jeu d'esprit plutôt que de besogne utile. M. Boucherot affirmait, il y a une dizaine d'années, qu'il y avait plus de méthodes de calcul de lignes que de lignes en service ; depuis lors le nombre de lignes construites a augmenté, mais le nombre de méthodes de calcul s'est

accru lui-même, de sorte que la boutade garde toute sa valeur.

Mais si cette question peut être considérée comme résolue du point de vue théorique depuis longtemps, on se trouve actuellement en présence non plus de lignes simples, mais de réseaux bouclés de plus en plus complexes, et le travail matériel nécessaire pour obtenir la solution numérique des problèmes de régulation soulevés par ces ensembles devient lui-même de plus en plus laborieux. Les ingénieurs ont tranché la difficulté en renonçant à une algèbre fastidieuse et pleine d'embûches, et en construisant des réseaux miniatures, électriquement homothétiques des réseaux réels, qui fournissent en quelques instants les résultats cherchés. Le seul inconvénient de ces réseaux artificiels est leur prix de revient relativement élevé qui en fait l'apanage de quelques rares bureaux d'études spécialisés.

Depuis une quinzaine d'années, l'intérêt des théoriciens s'est porté vers l'étude des régimes déséquilibrés. La théorie des coordonnées symétriques a permis de simplifier considérablement beaucoup de problèmes : son application au calcul des courants de court-circuit, à l'étude de la stabilité, à la réalisation de protections sélectives a été immédiatement très féconde. Toutes les conséquences pratiques de cette importante théorie ne sont probablement pas encore utilisées.

L'étude de la pénétration des courants alternatifs à l'intérieur des conducteurs, abordée depuis longtemps dans le cas des cylindres et des barres métalliques, a été récemment étendue au cas de la terre servant de conducteur de retour d'une ligne aérienne ou souterraine et la solution donnée à ce problème, soumise à l'expérience, s'est révélée aussi satisfaisante qu'on pouvait l'espérer étant donné les complexités qu'il comporte, et suffisante à l'heure actuelle pour les besoins de la pratique.

Toujours dans le domaine de la théorie, il reste d'ailleurs maints problèmes imparfaitement résolus : par exemple, ceux qui sont relatifs aux régimes troublés. La mise en équation de beaucoup de ces problèmes devient extrêmement laborieuse par suite du nombre considérable de variables en jeu et aboutit souvent à des relations que l'analyse mathématique devient impuissante à résoudre. Mais, à cet égard, on est en droit d'attendre beaucoup, dans l'avenir, des machines à intégrer dont l'usage commence à se développer aux Etats-Unis d'Amérique et qui ont déjà permis d'atteindre la solution numérique de certains problèmes fort importants.

IV. Le matériel de transmission de l'énergie. — L'évolution de la technique du matériel électrique de production et de transmission de l'énergie électrique, au cours de ces dernières années, a été longuement et très complètement exposée dans plusieurs conférences, en particulier dans celle de M. II. Parodi, faite à l'occasion du cinquantenaire de la Société française des Electriciens, en 1933, et dans celle de M. P. Bunet faite sous les auspices de « La Technique moderne » au cours de l'année dernière. Nous ne nous occuperons donc ici que de ce qui intéresse les lignes de transmission et leurs accessoires et encore ne le ferons-nous que très brièvement.

1. LES LIGNES AÉRIENNES, — La plus grande partie de nos réseaux à haute tension est constituée par des lignes aériennes, car, dans l'état actuel de la technique, le prix de revient de ce type de lignes est incomparablement plus réduit que celui des câbles souterrains.

Nous ne nous étendrons pas sur les particularités constructives de ces lignes, décrites maintes fois, et nous soulignerons seulement la tendance actuelle vers l'emploi, pour les très hautes tensions, de conducteurs lisses et creux qui permettent de résoudre le problème de l'effet de

couronne et vers l'utilisation de supports légers, souvent même articulés, constituant avec les conducteurs des ensembles homogènes dont la forme s'harmonise avec les efforts normaux ou accidentels auxquels ils sont soumis.

Nous insisterons quelque peu, par contre, sur certains ennemis auxquels ont à faire face ces lignes aériennes. Ces ennemis sont très nombreux et d'espèces très diverses, puisqu'il faut comprendre dans leur liste le givre et les aviateurs, la foudre et les auditeurs de radiodiffusion, le vent et les oiseaux. Peu de choses à dire d'ailleurs en ce qui concerne les aviateurs et les oiseaux, sinon qu'il faut les écarter, d'une part, en rendant ces lignes visibles jour et nuit et, d'autre part, en rendant inhospitaliers les perchoirs naturels que constituent leurs isolateurs. Les tubes à gaz rares permettent de résoudre partiellement le premier problème, mais des progrès restent à réaliser dans la construction de ces luminaires pour en augmenter le rendement et la longévité.

Pour ce qui est des auditeurs de radiodiffusion, le problème est très nouveau : il s'agit d'éviter tout le long des lignes les effluves qui constituent des sources d'ondes parasites migratrices se propageant à longue distance, guidées par les conducteurs. Ce problème n'est pas sans solution pour les lignes nouvelles : il conduit à prévoir des conducteurs lisses et de grand diamètre, des isolateurs de dimensions spécialement étudiées et munis d'écrans permettant de répartir convenablement le champ électrostatique, des raccords exempts de toute aspérité et enfin des bobines d'arrêt empêchant la propagation des perturbations susceptibles d'être engendrées en un point défectueux. Mais le problème est autrement ardu si l'on considère les réseaux existants qui n'ont pas été construits en tenant compte de ces nouvelles contingences et pour notre part nous ne connaissons pas de solution immédiate qui permette aux transporteurs d'énergie de se plier aux exigences d'une législation récente, vraiment

présomptueuse et pleine de paradoxe, sinon celle qui consiste à installer des antennes réceptrices hors de la zone perturbée et à relier ces antennes aux postes de réception par des conducteurs placés sous écrans.

Si nous abordons maintenant le rôle des agents atmosphériques, nous devons considérer d'abord le vent qui, lorsqu'il souffle en tempête, exerce des efforts considérables sur les conducteurs et oblige à donner aux supports des dimensions spécialement étudiées. Mais l'effet du vent se fait encore sentir d'une manière insidieuse alors même que sa vitesse reste modérée : les tourbillons qu'il provoque autour des conducteurs lorsqu'il les frappe normalement déterminent des vibrations transversales qui fatiguent le métal aux points d'attache et tendent à la longue à en provoquer la rupture. Le remède à ces manifestations est généralement cherché soit en donnant aux pinces de fixation une forme spéciale en vue de réduire les efforts de flexion locaux, soit dans l'installation d'amortisseurs mécaniques au voisinage de ces points de fixation. On a déjà noté d'ailleurs qu'en donnant aux conducteurs des formes adéquates on parviendrait à prévenir entièrement ces vibrations : il s'agit là encore d'un problème d'actualité soumis à l'ingéniosité des chercheurs.

Mais les plus grands dangers que courent les lignes aériennes, au moins au point de vue de leur sécurité d'exploitation proviennent des orages. Les idées en cette matière étaient encore fort imprécises jusqu'à il y a une quinzaine d'années et étaient restées sensiblement au stade d'évolution où les avaient portées les chercheurs du dix-huitième siècle. Mais devant la nécessité impérieuse où l'on se trouvait d'obtenir des moyens de défense réellement efficaces contre ce fléau, des recherches méthodiques ont été entreprises dans la plupart des pays, facilitées d'ailleurs par l'apparition de nouveaux appareils d'investigation. Ces recherches méthodiques ont déjà

permis d'avoir des idées plus précises sur les grandeurs mises en jeu par la foudre, sur la forme des décharges orageuses et sur leur durée : une meilleure connaissance du mal doit conduire à en trouver les remèdes. En particulier, on est à peu près d'accord aujourd'hui sur ce que les surtensions « induites » par les décharges atmosphériques sont fort loin d'atteindre les amplitudes qu'on leur attribuait autrefois et qu'au point de vue de leur vulnérabilité aux surtensions atmosphériques, les lignes se divisent en deux catégories : dans la première se rangent celles qui sont établies pour des tensions relativement basses comprenant, semble-t-il, les lignes à 60 kv établies avec des isolateurs rigides ; dans la seconde catégorie sont les lignes qui ne craignent plus que les coups de foudre directs : ce sont celles qui sont établies pour des tensions de service supérieures à 100 kv et même, croyons-nous, les lignes à 60 kv construites avec un coefficient de sécurité suffisant.

Pour ce qui est des lignes à moyennes tensions sensibles aux surtensions induites, le seul remède efficace connu consiste à installer des parafoudres ; ces appareils doivent constituer instantanément une dérivation entre les conducteurs et le sol dès qu'une surtension apparaît sur ces conducteurs, et l'impédance de cette dérivation doit être d'autant plus faible que l'amplitude de la surtension incidente est plus élevée ; enfin le courant de fréquence normale qui se trouve dérivé à travers le parafoudre doit être coupé dès que la surtension a disparu. L'évolution actuelle en matière de parafoudres est caractérisée par l'emploi de résistances non inductives, en substances spéciales, dont la valeur en ohms diminue rapidement sous l'influence des courants qui les traversent. Pour que ces appareils soient efficaces il est indispensable d'en installer un très grand nombre. Dans certaines réalisations récentes, intéressant des lignes aériennes traversant des régions particulièrement orageuses, on en est arrivé à

protéger chaque isolateur par une sorte de parafoudre simplifié, canalisant l'arc de contournement et assurant l'extinction de cet arc dès le premier passage par zéro du courant alternatif qui le parcourt.

Contre les coups de foudre directs qui n'épargnent pas les lignes à très haute tension, le seul système de protection n'est autre que le paratonnerre inventé par Franklin en 1760, et réalisé sous forme d'un ou plusieurs câbles conducteurs surplombant la ligne et mis à la terre à chaque pylône. Mais des études systématiques effectuées aux Etats-Unis d'Amérique depuis huit ans ont montré que la manière d'installer ces câbles de garde et leurs prises de terre nécessite des précautions très spéciales. D'abord on doit maintenir entre les câbles de garde et les conducteurs principaux des distances très supérieures à celles que l'on admettait jusqu'à maintenant. D'autre part, étant donné l'énorme intensité de courant mise en jeu par la décharge traversant un pylône foudroyé, l'armement du pylône peut être soumis à une différence de potentiel considérable par rapport aux conducteurs et cette différence de potentiel peut déterminer l'amorçage des chaînes d'isolateurs : pour diminuer ces différences de potentiel il faut donner aux prises de terre des résistances effectives aussi faibles que possible ; on en arrive même à concevoir que les isolateurs doivent être choisis en fonction de la résistance des prises de terre des pylônes. Pour certaines lignes particulièrement importantes et surtout lorsque la constitution du sol ne permet pas de réaliser aisément des prises de terre peu résistantes, on pose dans le sol, sous la ligne, un « contrepoids » constitué par un réseau de conducteurs reliés électriquement à la base des pylônes. Des lignes à très haute tension établies récemment aux Etats-Unis d'Amérique d'après ces nouvelles doctrines se sont révélées extrêmement sûres et pratiquement même immunisées contre les effets de la foudre. Il ne faut pas se dissimuler néanmoins que ces dispositions renchérissent

fortement le prix des lignes et que l'on hésitera longtemps encore avant d'en généraliser l'emploi dans des contrées où les orages ne sont pas particulièrement fréquents.

2. LES CABLES SOUTERRAINS. — Dans les grandes agglomérations où la construction de lignes aériennes est, en général, impossible, les liaisons entre les usines productrices d'énergie, les sous-stations de distribution et les postes d'abonnés, sont constituées par des câbles souterrains. Les puissances considérables et sans cesse croissantes que l'on demande aux artères principales de transmettre ont imposé des tensions de service de plus en plus élevées dont l'adoption, compatible avec des conditions normales d'exploitation, a été rendue possible par les progrès réalisés au cours de ces dernières années.

La tension de 15 kv était encore considérée, il y a peu de temps, comme une limite supérieure au delà de laquelle la construction des câbles présentait de très grandes difficultés. Si l'on considère que des réseaux souterrains destinés à fonctionner sous 220 kv sont actuellement en cours de pose, on ne peut douter de l'extraordinaire rapidité avec laquelle s'est perfectionnée la technique des câbles.

Ces progrès ne résident pas, à proprement parler, dans une révolution des procédés de fabrication ni dans des découvertes de nouveaux diélectriques, et le papier imprégné est resté le seul isolant normalement utilisé. C'est à peine, d'ailleurs, s'il est permis d'envisager d'ici longtemps le remplacement de ces matériaux, bien que des découvertes assez récentes dans le domaine des diélectriques ultraminesces laissent penser qu'une révolution soit un jour possible dans la technique des isolants.

Une des principales difficultés rencontrées dans la construction de ces câbles provient de ce que l'on n'a pas trouvé jusqu'ici le moyen de leur constituer une enveloppe à la fois étanche et élastique. Cette enveloppe,

actuellement réalisée en plomb, ne suit pas les dilatations et retraits que subit le câble lui-même au cours de ses échauffements et refroidissements successifs, et il se produit, à l'intérieur, des cavités, sources de danger pour la tenue du diélectrique. Pour résoudre cette difficulté, on construit actuellement des câbles imprégnés d'une huile fluide qui peut circuler librement à l'intérieur du conducteur et qui s'y trouve maintenue sous pression grâce à des réservoirs d'expansion disposés le long du parcours ; l'huile remplit ainsi constamment tout l'espace tubulaire. Ce type de câbles a permis de doubler le gradient de potentiel admissible et de tolérer des températures de régime beaucoup plus élevées que pour les câbles ordinaires : la capacité de transmission se trouve ainsi doublement accrue par la possibilité d'augmenter à la fois la tension de service et le courant de régime.

On essaye actuellement d'arriver à des résultats analogues en exerçant une pression, non plus à l'intérieur du câble au moyen de l'huile qui y circule, mais à l'extérieur de celui-ci. Le câble recouvert de sa gaine de plomb plastique est alors enfermé dans un tube d'acier dans lequel l'air est maintenu sous une pression élevée.

D'autres procédés sont encore à l'étude et permettent d'espérer que, dans la course vers des tensions de service de plus en plus élevées, les canalisations souterraines ne resteront jamais très en retard sur les lignes aériennes.

3. LES INTERRUPTEURS. — L'interrupteur à haute tension est probablement l'accessoire des réseaux dont la technique est encore la moins bien stabilisée ; il y a une dizaine d'années, nous aurions même pu dire que cette technique était une des moins bien établies. Pendant longtemps, la conception de ces appareils s'est inspirée de données purement empiriques ; mais l'extension des réseaux a exigé de leur part des conditions de fonctionnement de plus en plus difficiles et on a dû se

rendre compte un jour qu'il n'était plus possible de se contenter d'extrapoler des données trop incertaines. Les constructeurs se sont alors décidés à installer des laboratoires de recherches et, en une dizaine d'années, ces laboratoires ont permis d'édifier une technique nouvelle qui se perfectionne chaque jour et qui a déjà permis des réalisations remarquables. L'interrupteur dans l'huile s'est considérablement perfectionné, et certains prétendent même qu'il peut être aujourd'hui prédéterminé par le calcul aussi exactement qu'une machine ; nous partageons volontiers l'opinion de ceux qui prédisent une vie encore longue à ce type d'appareil, bien qu'il fasse déjà figure d'ancêtre. Auprès de lui, de nouveaux venus, utilisant soit l'air comprimé, soit des chambres de coupure spéciales à l'air libre, sont déjà entrés dans le domaine de la pratique, apportant avec eux la suppression des dangers d'explosion et d'incendie.

Les exigences des réseaux croissent d'ailleurs en même temps qu'évolue la technique de la coupure des arcs : on ne demande plus seulement à un interrupteur qu'il soit capable de couper des courants de court-circuit toujours plus violents dans des réseaux de tension toujours plus élevées, on veut aussi que cette coupure s'effectue dans des délais toujours plus courts ; des appareils à 280 kv pouvant couper 5000 A en moins de 0,05 seconde viennent d'être mis au point aux Etats-Unis d'Amérique.

De quoi demain sera-t-il fait dans ce domaine des interrupteurs L'évolution actuelle est trop rapide pour que l'on puisse faire à leur sujet des pronostics quelque peu sûrs.

4. LES RELAIS. — Lorsque les réseaux de transmission d'énergie fonctionnaient isolément et quand les usines génératrices alimentaient individuellement des systèmes de lignes disposés radialement, l'emploi de simples relais à courant maximum temporisés permettait d'isoler plus ou

moins vite la ligne défectueuse sans perturber exagérément les portions du réseau alimentées par les lignes saines. Mais lorsqu'on a commencé à faire fonctionner les usines en parallèle et à boucler les réseaux, ces dispositifs se sont révélés tout à fait insuffisants, et il a fallu imaginer de nouveaux systèmes de protection. C'est ainsi que s'est rapidement développée une technique nouvelle, la technique de la protection sélective, qui a suscité beaucoup de recherches et qui est d'ailleurs encore en pleine évolution. Le développement des relais différentiels a fourni la solution du problème dans un grand nombre de cas, par exemple pour les machines, pour les transformateurs et pour les lignes pouvant être groupées en parallèle. On a vu naître ensuite des systèmes utilisant des câbles pilotes, puis une nouvelle catégorie de relais dits d'impédance ou de réactance ; des systèmes utilisant des courants de haute fréquence portés par les lignes à haute tension et destinés à conjuguer l'action de relais installés aux extrémités de ces lignes sont à l'heure actuelle très en vogue. Il y a d'ailleurs peu de ces dispositifs qui se fassent véritablement concurrence, et chacun d'eux trouve, des cas spéciaux auxquels il s'adapte particulièrement bien. Mais nous croyons qu'au moins pour les lignes de transmission d'énergie la solution radicale du problème sera obtenue le jour où les relais de protection ne seront plus soumis à l'action des courants et des tensions du réseau proprement dit, mais bien à celle de courants auxiliaires, de haute fréquence par exemple, engendrés par des sources spéciales. Ces sources contrôleront directement l'état d'isolement des lignes, et la protection sélective sera ainsi rendue complètement autonome et indépendante du régime d'exploitation du réseau.

V. L'exploitation des réseaux. — Lorsque les premiers réseaux électriques se sont constitués, ils comprenaient essentiellement des « secteurs », alimentés chacun par une

seule usine génératrice appelée « centrale ». L'âme de ces secteurs était donc l'usine génératrice où se trouvaient concentrés tous les services d'exploitation. Les difficultés techniques rencontrées pour faire fonctionner en parallèle les machines à piston des usines thermiques étaient déjà suffisantes pour que l'on n'ait pas estimé utile d'étendre cette mise en parallèle à des usines différentes ; mais surtout l'intérêt économique qu'aurait pu présenter une telle mise en parallèle se trouvait masqué par des considérations de concurrence, et par un désir non déguisé de chaque secteur de garder une autonomie complète ; la continuité du service n'était pas encore une nécessité assez impérieuse pour faire passer ces contingences au second plan.

Aujourd'hui, tout au contraire, il n'est plus guère d'usine génératrice thermique ou hydraulique qui ait gardé ce superbe isolement, ni de réseau de distribution qui soit alimenté par une usine spéciale. Une évolution très importante, on pourrait dire une révolution, s'est ainsi produite dans la technique de la production et de la transmission de l'énergie, par suite de la mise en parallèle des usines et de l'interconnexion des réseaux. Il semble à peu près impossible de retracer l'histoire de cette évolution, car les mobiles, qui ont conduit les usines à abandonner leur autonomie et qui ont fait accepter aux entreprises différentes la discipline nécessaire à la marche en parallèle n'ont pas été les mêmes dans toutes les régions et dans tous les pays.

Il y a moins de quinze ans, les usines génératrices thermiques desservant de grandes villes comme New-York, Chicago, Paris, débitaient sur des réseaux de distribution isolés et n'avaient entre elles que des liaisons précaires permettant tout au plus d'effectuer des « reports », mais nullement destinées à assurer une marche en parallèle régulière. Puis, que ce soit en Californie ou dans le sud-est de la France, on a été rapidement conduit à combiner la

marche des usines hydrauliques avec celle des usines thermiques : l'irrégularité du débit des rivières imposait cette combinaison.

Un peu plus tard on a dû construire des lignes destinées à relier des centres de production d'énergie hydraulique possédant des régimes hydrologiques différents, et ces lignes ont commencé à constituer les premiers éléments des interconnexions interrégionales. Dans les grands centres urbains, la construction d'usines génératrices de grande puissance produisant l'énergie à bon compte a conduit à concentrer davantage la production, à utiliser ces usines thermiques pour fournir la charge de base et les anciennes usines pour fournir seulement les pointes : pour ce faire, la marche en parallèle de toutes les usines thermiques alimentant une même ville devenait indispensable. Dans les centres métallurgiques et miniers, le désir d'utiliser toute l'énergie disponible a conduit de même à constituer des réseaux pour faire fonctionner les usines génératrices en parallèle. Enfin, des sociétés productrices, desservant des régions voisines et qui avaient déjà pris l'habitude de faire fonctionner en parallèle leurs propres usines, ont éprouvé le besoin d'interconnecter leurs réseaux, de manière à se porter un secours mutuel et à augmenter la sécurité de leur exploitation sans être obligées d'augmenter leur puissance de réserve.

Ainsi, de proche en proche, et toujours dans le but d'augmenter le rendement de la production en même temps que la sécurité, les réseaux d'interconnexion se sont développés dans tous les pays, en dépassant même souvent leurs frontières, avec une rapidité qui démontre à elle seule l'intérêt considérable que chacun a pu retirer de ces opérations.

Le premier résultat de ces interconnexions a été de bouleverser le mode d'exploitation des usines et des réseaux. L'usine génératrice s'est vue dépossédée de l'initiative complète de la production et des manœuvres de

lignes qu'elle avait autrefois ; chaque usine n'est plus qu'un élément plus ou moins important d'un ensemble complexe dont le contrôle lui échappe, et elle est devenue un agent d'exécution aux ordres d'un organisme central : le poste répartiteur. La mission de cet organisme central ne manque d'ailleurs pas d'être délicate ; son premier devoir est de prévoir à l'avance les besoins de la clientèle en fonction de l'horaire, de connaître les sources d'énergie qui pourraient être mises à sa disposition, puis, compte tenu de ces prévisions et de ces renseignements, d'organiser à l'avance des programmes de marche des différentes usines et d'envoyer en temps utile ces programmes aux intéressés. Il doit ensuite surveiller constamment l'exécution des programmes imposés, commander les manœuvres de lignes que peuvent exiger les variations de la charge ou les nécessités d'entretien, et enfin, en cas d'événement imprévu dans le réseau ou dans les usines, faire donner les réserves en temps utile et faire exécuter toutes les manœuvres nécessaires pour parer à un arrêt de la distribution.

L'outil essentiel du répartiteur est le réseau de télécommunications, qui lui permet d'être toujours en liaison avec tous les points stratégiques du réseau : usines, sous-stations, bureaux de répartition des réseaux voisins. Le service de liaison téléphonique prend ainsi, dans les réseaux modernes, une importance capitale : la sécurité d'exploitation des transmissions d'énergie dépend essentiellement de la sécurité de ces liaisons. Les systèmes de téléphonie par ondes porteuses, transmises le long des lignes à haute tension, apportent une solution très heureuse à ce problème des télécommunications, et sont particulièrement précieux dans nos pays où les communications téléphoniques à grande distance ne sont sûres que lorsqu'on peut utiliser certains câbles souterrains, encore peu nombreux, et reliant seulement entre elles quelques grandes villes privilégiées. Pour faire

face aux problèmes posés par ces télécommunications toujours plus nombreuses, la technique des courants porteurs devra encore évoluer : le nombre de longueurs d'onde pratiquement utilisables est limité et les recherches devront se poursuivre en vue d'économiser ces longueurs d'onde ; déjà les modulations multiples d'une même onde porteuse permettent d'utiliser une même « voie » pour plusieurs télécommunications ; les possibilités de filtrer des bandes latérales de modulation ne sont pas encore couramment utilisées, mais le seront sans doute quelque jour.

Les techniques des courants forts, des courants faibles et des radiocommunications, qui évoluèrent autrefois de manières tellement divergentes que leurs spécialistes utilisaient des langages différents pour désigner des instruments analogues, se rejoignent de la sorte, par la force des choses, pour le plus grand profit d'ailleurs de chacune d'elles.

Nous noterons enfin que, dans des ensembles aussi complexes que sont déjà les réseaux d'interconnexion modernes, la manœuvre manuelle des différents dispositifs de réglage devient de plus en plus délicate, et que l'on doit de plus en plus lui substituer des appareils automatiques. Ces régulateurs automatiques doivent souvent agir en fonction de grandeurs mesurées à distance ; d'où la création de toute une série de dispositifs de télémesures et de télé réglages, qui constitue présentement une des principales préoccupations des techniciens.

Tous ces éléments auxiliaires, auxquels il faudrait encore ajouter les appareils de contrôle de toutes sortes, tels que les oscillographes automatiques, accroissent sans doute d'une manière importante les frais d'installation des réseaux d'interconnexion et peuvent même rendre déficitaire leur exploitation si, comme c'est quelquefois le cas, ils ont été négligés dans les devis de premier établissement.

A cet égard, nous ne pouvons pas nous empêcher de nous demander si, à l'heure actuelle, l'idée d'interconnexion n'a pas été poussée un peu trop loin, au moins dans certains cas particuliers d'ailleurs assez rares, et si elle n'est pas devenue pour quelques-uns une véritable mystique conduisant à des réalisations trop hâtives. S'il est, en effet, des interconnexions dont l'utilité n'est pas douteuse du double point de vue technique et économique, il en est d'autres au contraire qui, manifestement, ne sont pas raisonnables. La période troublée que nous traversons est sans doute responsable de ces quelques erreurs ; les Etats, en cherchant à stimuler l'activité économique des pays, ont souvent facilité la construction de certaines lignes ou même de certains ensembles de lignes qui n'auraient pas vu le jour si les intérêts des sociétés d'exploitation et de leur clientèle avaient été seuls en cause. Une autre part de responsabilité doit sans doute être attribuée à la formation technique insuffisante de quelques animateurs auxquels les difficultés d'exploitation des réseaux ont échappé, ou qui ont méconnu les dépenses qu'ils devront consentir par la suite pour rendre cette exploitation possible.

VI. Conclusions. — L'industrie de la transmission et de la distribution de l'énergie électrique, née voici cinquante ans, a connu durant ce demi-siècle un développement prodigieux. Elle joue à l'heure actuelle, dans tous les pays, un rôle économique et social de toute première importance, non seulement parce qu'elle permet à chacun d'augmenter son bien-être à peu de frais, mais, et peut-être surtout, parce qu'elle assure l'existence d'un grand nombre d'industries connexes, mécaniques, métallurgiques, etc.

Cette industrie a été jusqu'ici relativement prospère : c'est d'ailleurs grâce à cette prospérité qu'elle a pu évoluer, entretenir ses effectifs de techniciens, subventionner directement ou indirectement des

laboratoires de recherches et des écoles et assurer par là même la prospérité des autres industries qui en dépendent.

Elle peut encore avoir devant elle une longue ère de développement : d'abord l'exemple donné par certains pays prouve que la consommation d'énergie par habitant est susceptible d'augmenter encore dans des proportions importantes, et l'aménagement des réseaux, en vue d'augmenter leur capacité de transmission, doit encore absorber bien des activités : d'autre part, même en admettant un arrêt plus ou moins long dans l'accroissement de la consommation d'énergie, le perfectionnement et la mise au point des réseaux actuels, en vue d'augmenter leur sécurité et leur rendement, peuvent encore motiver de longs efforts et d'ingénieuses innovations.

Mais, pour que ce développement ne soit pas paralysé, pour que cette industrie ne soit pas condamnée à végéter et pour que les industries qu'elle entretient indirectement ne soient pas ainsi réduites à la ruine, certaines conditions devront être remplies à l'avenir.

Il faudra d'abord éviter avec une prudence extrême les aménagements antiéconomiques, chose qui peut paraître bien évidente à priori, mais qui a été tout de même quelquefois oubliée. Les lignes de transmission d'énergie faisant double emploi et les usines génératrices inutiles sont déjà trop nombreuses.

Il faudra aussi mener une campagne active pour éduquer le public, afin de défendre les entreprises contre les menaces de la démagogie des tarifs : on a trop reculé avant de faire savoir à ce public que le coût du charbon n'intervient que pour une part négligeable dans les frais de production, de transport et de distribution de l'énergie, et s'il n'a pas saisi le rôle de la durée d'utilisation dans le prix de revient de cette énergie, c'est sans doute parce qu'on n'a pas pris le soin de l'en avertir assez tôt. Un public qui accepte de payer l'eau que l'on distribue chez lui, alors que

cette eau est prise à la rivière et ne coûte rien, est certainement capable de comprendre ce que peuvent être des charges de capital et des frais d'exploitation. Il faudra aussi lui rappeler plus souvent que l'énergie électrique est une des seules marchandises dont le prix ait très sensiblement diminué depuis la période précédant la guerre de 1914-1918, prise comme point de comparaison.

Chez nous enfin, il faudra rénover l'enseignement de l'électrotechnique en vue de former les cadres futurs de cette industrie, car l'organisation actuelle de cet enseignement n'est plus en harmonie avec les progrès de la technique et les desiderata modernes. Le bref aperçu que nous avons esquissé montre que l'exploitation des grands réseaux interconnectés exige maintenant, de la part de ses techniciens, une foule de connaissances qui pouvaient paraître autrefois superflues et où prennent place aussi bien le calcul des probabilités et la statistique que l'électrotechnique des courants forts et des courants faibles.

On a reconnu, il y a bien longtemps, que des jeunes hommes doués d'une haute culture générale devaient faire dans des écoles spéciales un stage de deux années pour apprendre l'art de construire des viaducs et des routes ou d'exploiter des mines ; il est grand temps que l'on s'aperçoive qu'un délai au moins aussi long est aujourd'hui nécessaire pour apprendre l'art de construire, d'exploiter ou de contrôler des usines de production d'énergie électrique et des réseaux d'interconnexion.

J. FALLOU.

1 Revue générale de l'Electricité, 7 décembre 1935, t. XXXVIII, P. 761-762. J. FALLOU ; L'état actuel de la technique des réseaux de transmission d'énergie électrique. Revue générale de l'Electricité, 9 novembre 1935, t. XXXVIII, p. 635-645.

2 Dans cette note sont cités les travaux de G. CABANELLAS. Ces travaux, dans le tome I de La Lumière électrique, en 1879, ont paru sous la signature de GESSÉ, pseudonyme de G. Cabanellas, officier de marine. — Cette indication, utile pour les recherches bibliographiques, nous a été donnée par M. J. BETHENOD et nous l'en remercions ici.

3 J. BERTRAND ; Des progrès de la mécanique : Marcel Deprez. La Lumière électrique, 13 octobre 1883, t. x, p. 194-206 et Revue des Deux-Mondes, 15 octobre 1883.

4 La sous-commission était ainsi composée : J. Bertrand, président ; Becquerel. Collignon, Cornu, Laussedat, Maurice Lévy, A. Sartiaux ; Léon Lévy, ingénieur au Corps des Mines, remplissait les fonctions de secrétaire.

5 Abréviations employées pour les documents cités : C R., le. des Sc., pour Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences. — L. E., pour La Lumière électrique.

6 Marcel Deprez cite ici : CABANELLAS (voir : GESSÉ. L. E., 1879, t. I).

9 Cliché de : L. SCHÜLER ; Geschichte des Transformators (Histoire du transformateur). Gecschichlliche Einzeldarstellungen ans der Elektrotechnik (Exposés de quelques faits historiques de l'électrotechnique), l.. 1. p. 11, édité par l'Elektrolechnischer Verein, à Berlin (198).

7 GAULARD ; Le générateur secondaire de MM. Gaulard et Gibbs. Bulletin de la Société internationale des

Electriciens, février 1884, t. 1, p. 79-83. Discussion (Sir Charles BRIGHT, E. HOSPITALIER et L. GAULARD), p. 83-85.

8 Ce fut E. Hospitalier qui proposa cette appellation, adoptée dans la suite, à la séance du 5 mars 1884 de la Société internationale des Electriciens : E. HOSPITALIER ; Les transformateurs d'énergie électrique Bulletin de la Société internationale des Electriciens, 5 mars 1884, t. 1, p. 112-121.

10 Son adresse sur la liste des fondateurs de la Société internationale des Electriciens était : 18, Warwich street, Regent street, Londres (Bulletin de la Société internationale des Electriciens, 1884, t. 1, p. 45).

11 La fréquence employée généralement était de 8000 « alternativités » à la minute, soit 133 p : s. Cette fréquence relativement élevée, qui fut usitée primitivement dans de très anciennes installations en Angleterre et aux Etats-Unis d'Amérique, diminuait heureusement les inconvénients d'un circuit magnétique ouvert. Les transformateurs avaient été construits par MM. Woodhouse et Rawson, à Londres.

12 HOPKINSON ; Rapport à The national Company for the Distribution of Electricity by secondary Generators. Bulletin de la Société internationale des Electriciens, mai 1884, t. I, p. 185-187. E. HOSPITALIER ; Réponse au rapport du docteur Hopkinson. Bulletin de la Société internationale des Electriciens, 4 juin 1884, t. I, p. 224-225.

13 Marcel DEPREZ ; Sur les générateurs secondaires de MM. Gaulard et Gibbs. La Lumière électrique, 11 octobre 1884, t. XIV, p. 41-43.

14 G. COLOMBO ; Le système Gaulard et Gibbs à l'exposition de Turin. La Lumière électrique, 11 octobre 1884, t. XIV, p. 43-46.

15 Le jury était composé de MM. F. Weber, Voit, Kittler, Roiti et Ferraris.

16 Des régulateurs analogues ont été souvent proposés dans la suite, et le régulateur Dick en constitue une réalisation encore utilisée pour le réglage des dynamos d'éclairage des trains.

17 Ainsi que nous l'avons indiqué à maintes reprises, G. Ferraris tenait déjà compte des pertes dans le fer par un déphasage entre les ampères-tours résultants et le flux. (Mémoires présentés à l'Académie des Sciences de Turin, 11 janvier et 10 mai 1885, 4 décembre 1887). Galileo FERRARIS ; Ricerche teoriche e sperimentali sul generatore secondario Gaulard et Gibbs. Memorie della Reale Accademia delle Scienze di Torino, 11 janvier 1885. t. XXXVII (2^e série), p.1, traduit par Cesare GERLARI dans La Lumière électrique, 30 mai, 6, 20 et 27 juin 1885, t. XVI. p. 397-407, 460-465, 551-561 et 602-616.

18 P. CLÉMENCEAU ; L'usine centrale d'éclairage électrique à Tours. La Lumière électrique, 22 mai 1886, t. xx, p. 340-342.

19 Il était né à Paris le 16 juillet 1850, dans une maison qui possède le numéro 79 de la rue Vieille-du-Temple et dont la façade porte une plaque commémorative ; il était le onzième d'une famille de douze enfants.

20 J. BOURDIN ; Discours prononcé sur la tombe de L. Gaulard. La Lumière électrique, 8 décembre 1888, t. XIX. p. 497-498. — Un épisode de l'histoire du grand prix de Turin. La Lumière électrique, 15 décembre 1888, t. xxx, p. 543-545.

21 Galileo FERRARIS. Extrait de Ingegneria civile e le Arti industriali.

22 Bulletin de la Société internationale des Electriciens, février 1899, t. XVI, p. 35-36.

23 Bulletin de la Société internationale des Electriciens, mars 1899. t. XVI, p. 174.

24 La Lumière électrique, 10 février 1883, t. VIII, p. 198-190.

25 Il serait injuste de reprocher à L. Gaulard les assertions contenues dans ce brevet, si on songe qu'un an plus tard des ingénieurs instruits, tels que E. Hospitalier et M. Deprez, mettaient en doute l'utilisation industrielle des transformateurs statiques.

26 Si d'ailleurs l'énergie n'était distribuée qu'à des abonnés d'éclairage, ce coefficient serait encore 10 fois plus élevé, et c'est grâce aux fournitures faites en dehors des « heures de pointe » que les charges financières ne prennent pas déjà des proportions exorbitantes : ainsi se justifie l'énorme différence (souvent mal comprise du grand public) entre le prix de l'énergie destinée à l'éclairage et celui de l'énergie destinée à d'autres usages.

*Commémoration du cinquantième des
premières réalisations de transmission d'énergie
par l'électricité , travaux et expériences de
Marcel Deprez sur la transmission d'énergie par
l'électricité en France, travaux de Lucien ...*

<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6370807h>

À propos de cette édition numérique

Cette édition numérique est issue d'un programme de numérisation du patrimoine mené par la Bibliothèque nationale de France pour enrichir Gallica, la bibliothèque numérique de la BnF et de ses partenaires. En ligne depuis 1997, Gallica s'enrichit chaque semaine de milliers de nouveautés et offre aujourd'hui accès à plusieurs millions de documents numérisés : imprimés (livres, revues et fascicules de presse), manuscrits, estampes et photographies, documents sonores, partitions, cartes et plans... Les imprimés sont d'abord numérisés en mode image (prise de vue photographique) puis le texte est extrait de manière automatique grâce aux techniques de reconnaissance optique de caractères (*optical character recognition* ou

OCR). Les algorithmes informatiques utilisés définissent également de manière automatique la structure de l'ouvrage (en-têtes et pieds de page, illustrations, tableaux, etc.). L'état du document imprimé (taches, pages déchirées) et les caractéristiques de la typographie employée peuvent entraîner des erreurs lors de l'OCR. Le texte ainsi produit est ensuite relu, corrigé, et converti au format ePub (*electronic publication* ou « publication électronique »), format ouvert standardisé pour les livres numériques. Malgré tous nos efforts pour respecter au mieux le format original du livre, il est possible que vous retrouviez des coquilles ou des problèmes de mise en page qui auraient échappé au relecteur. N'hésitez pas à nous signaler ces anomalies à l'adresse gallica@bnf.fr.

Conditions d'utilisation

1/ Les contenus accessibles sur le site Gallica sont pour la plupart des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public provenant des collections de la BnF. Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n°78-753 du 17 juillet 1978 :

- La réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur et notamment du maintien de la mention de source.
- La réutilisation commerciale de ces contenus est payante et fait l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

Cliquer ici [pour accéder aux tarifs et à la licence](#)

2/ Quelques contenus sont soumis à un régime de réutilisation particulier. Il s'agit :

- des reproductions de documents protégés par un droit d'auteur appartenant à un tiers. Ces documents ne peuvent être réutilisés, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.
- des reproductions de documents conservés dans les bibliothèques ou autres institutions partenaires. Ceux-ci sont signalés par la mention Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque municipale de ... (ou autre partenaire). L'utilisateur est invité à s'informer auprès de ces bibliothèques de leurs conditions de réutilisation.

3/ Gallica constitue une base de données, dont la BnF est producteur, protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle.

4/ Les présentes conditions d'utilisation des contenus de Gallica sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

5/ L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6/ Pour obtenir la reproduction d'un document de Gallica en haute définition, contacter reproduction@bnf.fr

7/ Pour utiliser un document de Gallica sur un support de publication commercial, contacter utilisation.commerciale@bnf.fr