

56

SOCIÉTÉ INDUSTRIELLE

du Nord de la France

DÉCLARÉE D'UTILITÉ PUBLIQUE PAR DÉCRET DU 12 AOÛT 1874.

LIBRAIRIE  
COMMERCE  
LILLE

# L'ÉLECTRICITÉ

CONSIDÉRÉE

COMME UN TRANSMETTEUR D'ÉNERGIE

## CONFÉRENCES

FAITES LES 24 AVRIL, 8 ET 22 MAI, 1887

A LA SOCIÉTÉ INDUSTRIELLE DU NORD

PAR

**M. Aimé WITZ,**

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES,

DOCTEUR ÈS-SCIENCES,

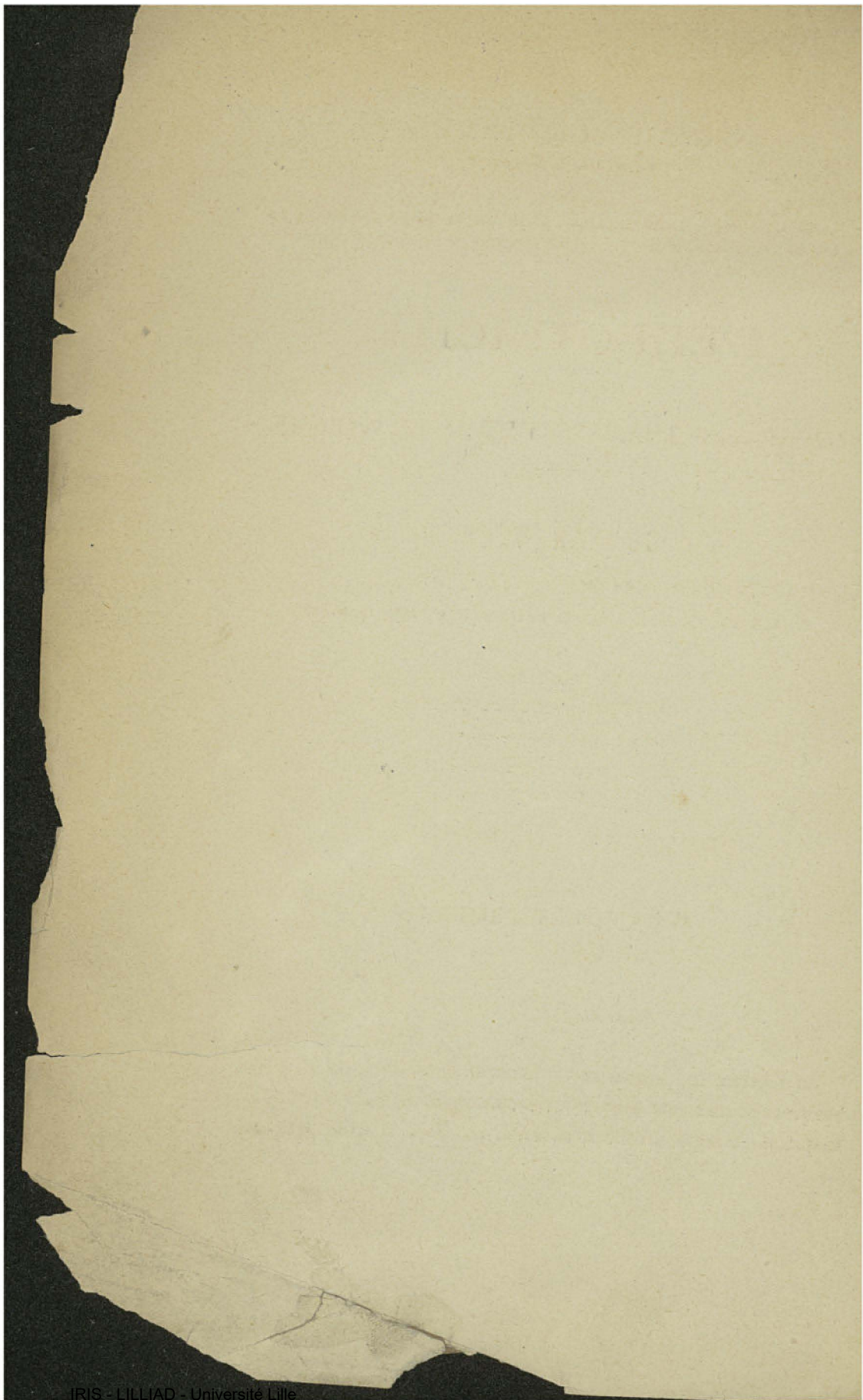
PROFESSEUR A LA FACULTÉ LIBRE DES SCIENCES DE LILLE.



LILLE,

IMPRIMERIE L. DANIEL.

1887.



56

N° 3885311-165099



SOCIÉTÉ INDUSTRIELLE

du Nord de la France.

La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le Bulletin.



# L'ÉLECTRICITÉ

CONSIDÉRÉE

COMME UN TRANSMETTEUR D'ÉNERGIE.

BMIC 48

## CONFÉRENCES

*Faites les 24 Avril, 8 et 22 Mai, 1887*

A LA SOCIÉTÉ INDUSTRIELLE DU NORD

PAR

M. AIMÉ WITZ,

Ingénieur des Arts et Manufactures,  
Docteur ès-Sciences,  
Professeur à la Faculté libre des Sciences de Lille.

## PREMIÈRE CONFÉRENCE

NATURE ET ROLE DE L'ÉLECTRICITÉ.

MESSIEURS,

En appelant un professeur à l'honneur d'inaugurer la série des conférences qui seront données dans cette salle, le Conseil d'administration de notre Société Industrielle du Nord a voulu marquer

bien clairement son intention de créer un enseignement populaire : c'est une grande pensée et une noble entreprise, et je me ferai l'interprète des sentiments de tous en félicitant tout particulièrement M. Ferdinand Mathias, notre honorable président, et en le remerciant de son initiative féconde. La vulgarisation des sciences industrielles devait être inscrite dans nos programmes ; en contribuant à la diffusion des connaissances utiles, nous faisons une œuvre scientifique de la plus grande portée en même temps qu'une œuvre vraiment patriotique. Le savant dont l'Angleterre est si justement fière, l'illustre Faraday, était un apprenti relieur, qui connut sa vocation en suivant les cours publics de Davy ; Ruhmkorff travaillait en chambre et son éducation scientifique s'est faite aux leçons du soir, si nombreuses à Paris, qu'il entendait à la dérochée, aux heures bien méritées du loisir et du repos ; Thomas Alva Edison, l'infatigable chercheur de Menlo-Park, l'inventeur inépuisable du phonographe, du télégraphe quadruplex, de la lampe à incandescence et de tant d'autres merveilles, vendait naguère encore des journaux dans les rues de New-York et il n'a pas eu d'autres maîtres que des conférenciers populaires. Ces exemples, qu'on pourrait multiplier, démontrent mieux qu'un long discours l'utilité de ces Matinées scientifiques du Dimanche. Le professeur de la Faculté libre des sciences, qui a été invité à en commencer la série, est confus de la distinction dont il a été l'objet de la part de ses collègues ; la Société Industrielle compte parmi ses membres des maîtres plus éminents, des savants dont la parole est plus habile et l'enseignement plus autorisé ; vous les entendrez bientôt, Messieurs ; je me borne à déclarer qu'aucun d'eux ne sera plus fier que moi, ni plus heureux de donner son concours à cette belle œuvre.

On nous demande de vulgariser quelques parties de la science : c'est une tâche malaisée. Il s'agit en effet d'être simple sans vulgarité, de rester clair et intelligible sans abaisser la science, d'être instructif sans devenir ennuyeux, en un mot d'être savant sans le paraître. On exige du vulgarisateur plus d'idées que de mots, et cependant les théories font peur : il faut absolument les émailler d'exemples

et d'anecdotes, pour en corriger l'aridité et la monotonie. J'ai conscience des difficultés de l'entreprise, mais je compte sur votre attention pour me la faciliter, et sur votre indulgence pour m'épargner les critiques auxquelles je m'expose ; c'est avec cette confiance que je vous propose de consacrer trois réunions à l'étude de cette science qui a révolutionné le monde, et dont les progrès étonnants seront l'honneur de ce siècle: vous avez nommé l'Electricité.

Nous réaliserions un grand point, si nous emportions de ce premier entretien une idée bien exacte et bien nette de la nature de l'électricité et de son rôle ; dans une seconde séance, nous vous ferons connaître et apprécier cet admirable système d'unités, qui a simplifié et facilité la solution de tous les problèmes électriques d'une façon si remarquable qu'ils sont aujourd'hui à la portée de tous ; enfin, notre troisième conférence sera consacrée aux distributions d'électricité, et nous verrons par quels procédés le mystérieux agent est transmis, transformé et débité au gré de nos désirs et suivant les besoins de l'industrie. Que de progrès en vingt ans !

Un ancien professeur d'université, resté pendant quelques années à l'écart de la science, déclarait un jour avoir éprouvé une sensation analogue à celle du réveil de la Belle au bois dormant, lorsqu'il dut se remettre au courant de l'électricité. C'est qu'en effet cette partie de la physique a marché à pas de géant ; elle a ouvert un nouveau monde à l'activité humaine, et toutes les forces vives de l'intelligence ont été appelées à la conquête de ce vaste et riche domaine que la Providence semble avoir réservé à ce temps. On se rend bien compte des progrès accomplis en comparant aux anciens traités d'électricité ceux qui se publient aujourd'hui. Entre les livres de Becquerel et de de la Rive et ceux de Gordon, de Mascart et de Joubert, de Jenkin et de Maxwell édités récemment, il y a en apparence quelques siècles d'efforts continus et de succès constants : en réalité, cinquante ans les séparent à peine. Tout est nouveau dans nos livres et surtout le vocabulaire : si Ampère revenait parmi nous, il ne pourrait lire nos travaux sans l'aide d'un lexique, car les dynes, les ergs, les megohms

et les microfarads lui seraient aussi incompréhensibles que le téléphone lui serait inconnu.

Ces modifications profondes, subies par la littérature scientifique, ont fait naître une erreur regrettable que nous voudrions dissiper ; on croit qu'il y a en ce moment deux sciences de l'électricité, celle qu'on a étudiée autrefois dans Ganot, Fernet ou Boutan, et celle qu'appliquent aujourd'hui les électriciens de profession. La première science paraît fort attardée, et elle l'est en effet, si vous évoquez des souvenirs de trente ans ; la seconde semble avoir pour elle seule les promesses de l'avenir. Des savants et des professeurs on n'espère rien que de vaines théories ; des praticiens on attend tout, et l'on ne s'étonnerait pas si demain on apprenait qu'Edison a trouvé le moyen de se faire photographe de New-York à Paris. L'électricité a sa légende en plein XIX<sup>e</sup> siècle.

Il est bien vrai que nul ne saurait dire où s'arrêteront les applications de l'électricité : qui prévoyait, en 1874, qu'en 1887 on se parlerait de Paris à Bruxelles ? Nous verrons peut-être de bien plus étonnantes choses encore. Mais l'électricité n'a fait en réalité et ne fera de progrès que par les efforts combinés des théoriciens et des praticiens : les premiers posent les principes, les seconds en déduisent les conséquences ; réciproquement, les seconds découvrent des faits nouveaux que les premiers développent et font fructifier. En même temps que Gramme, Bell et Edison inventaient d'ingénieux appareils, les savants creusaient les questions soulevées à cette occasion : aujourd'hui la science a fortement déblayé le terrain, elle a tracé un profond sillon et elle a jeté de bien solides fondations. Mon sujet me permettra de vous faire comprendre cela ; en résumant nettement ce que nous savons de la nature de l'électricité, je ferai ressortir ce que nous ignorons encore, ce que nous ignorerons toujours et qu'Edison ne nous fera pas connaître. Par contre, j'énoncerai des principes certains et indiscutables, basés sur une étude rationnelle des faits d'observation, et vous reconnaîtrez que ces principes élargissent singulièrement

nos vues et facilitent les recherches des inventeurs de profession, qu'on a si bien nommés les aventureux pionniers de la science.

---

Qu'est-ce que l'électricité ?

Je serais fort embarrassé par cette question.

Un professeur la posait un jour à un candidat au baccalauréat : « Qu'est-ce que l'électricité », lui disait-il. — Le pauvre jeune homme réfléchit et, ne trouvant rien à répondre, il se troubla : « Je l'ai su, balbutia-t-il, mais je l'ai oublié ». — « Quel malheur, s'écria l'interrogateur, le seul homme qui ait su, en France, ce qu'est l'électricité, voilà qu'il l'a oublié ».

Qu'y a-t-il de vrai dans ce jugement ? Aucun français ne sait-il vraiment ce qu'est l'électricité ? Ignorons-nous ce qu'est l'électricité, parce que nous ne répondons pas à la question de l'imprudent professeur ? Ce n'est pas mon avis. Demandez donc à un philosophe ce qu'est l'espace, à un artiste ce qu'est le beau, à un peintre ce qu'est le coloris, à une femme ce qu'est la douceur et la grâce ? Ils ne vous répondront pas et pourtant ils le savent fort bien.

Quand on ne me demande pas ce qu'est le temps, disait un grand philosophe, je le sais bien ; quand on me le demande, je ne le sais plus (1).

J'en dirai autant de l'électricité ; si vous me questionnez, permettez-moi de ne pas vous répondre ; mais je m'engage néanmoins à vous faire savoir aujourd'hui même ce qu'est l'électricité.

Le mot ne dit rien par lui-même ; il vient d'ἤλεκτρον, qui signifie ambre. Voici son origine : Thalès de Milet découvrit, 600 ans avant J.-C., que l'ambre jaune frotté attirait les corps légers. Cette propriété valut son nom au phénomène.

---

(1) *Si nemo ex me quærat, scio ; si quærenti explicare velim, nescio.*

(Saint Augustin).

Jusqu'en 1600, on ne sut rien de plus; le cheval de Tibère émettait, il est vrai, des étincelles quand on le frottait fortement; la lance de Bélisaire jetait des flammes; un frère d'armes d'Attila voyait jaillir des étincelles de ses vêtements quand il les quittait: mais ces faits tenaient du prodige pour les anciens et ils échappaient de la sorte à tout examen.

En 1600, disais-je, Gilbert, médecin de la reine Élisabeth d'Angleterre, découvrit que le soufre, la gomme-laque, le sel-gemme, l'alun de roche avaient la propriété de l'ambre; mais il fallut attendre Gray pour constater en 1729, que cet état particulier pouvait se transmettre et se propager au loin. C'était un grand pas, on connaissait la conductibilité électrique des métaux. Du Fay, observa en même temps que Gray, et presque avec lui, que certains corps ne conduisaient pas, au contraire, l'électricité; la soie, le verre, la gomme-laque, les résines, l'ivoire, le soufre, le bois sec étaient des isolants: on y a ajouté aujourd'hui le caoutchouc et la gutta-percha. Du Fay mit bientôt sa découverte en pratique: couché dans un hamac de soie, il se faisait électriser par l'abbé Nollet, au contact d'un gros tube de verre frotté; c'est dans ces conditions que la première étincelle fut tirée du corps humain. C'était en 1745; ce fut un gros évènement qui émut la cour et la ville et causa une immense sensation. Sept ans après, Dalibard démontrait à Marly, le 10 mai 1752, la présence de l'électricité dans les nuages orageux, devant de quelques jours l'expérience de Franklin, qui fut réalisée à Philadelphie, au mois de juin de la même année. Pourquoi ne revendiquions nous pas pour la France ses gloires nationales?

On peut dire que la science était créée.

Il était possible dès lors de hasarder quelques explications des faits, d'autant plus que les phénomènes d'influence venaient d'être découverts par Canton, et que la bouteille de Leyde avait fait connaître la condensation électrique.

Exposons en deux mots la théorie que Du Fay et Nollet ont proposée. En frottant un corps, on l'électrise. Or, il y a deux manières d'être



des corps électrisés : le verre et la résine en sont les deux types. Frottez du verre avec de la laine, de la résine avec une peau de chat, et vous aurez produit deux états bien distincts, qu'une balle de sureau vous permettra de reconnaître ; en effet, la résine l'attirera vivement d'abord et la repoussera après contact, tandis qu'alors le verre l'attirera. Du Fay admit que ces deux états étaient dus à des fluides distincts, qu'il appela l'un *vitré*, l'autre *résineux* ; on dit aujourd'hui fluide positif et négatif. Le verre est positif, la laine négative, la résine négative, la peau de chat positive. Il semblerait que cette production simultanée des deux fluides sur le corps frottant et sur le corps frotté ne puisse s'expliquer que d'une manière, en admettant l'existence d'un fluide neutre, formé par la réunion des deux fluides que le frottement a la propriété de séparer : c'est l'hypothèse qui a prévalu.

Coulomb formula les lois de l'action réciproque des deux fluides : les fluides de même nom se repoussent, les fluides de nom contraire s'attirent. Ces répulsions ou attractions sont proportionnelles aux quantités d'électricité en présence et en raison inverse du carré de leur distance. L'électricité statique était dès lors connue.

La question en était là quand, en 1780, Galvani découvrit l'électricité animale ; puis un autre génie, Alexandre Volta, démontra que le contact de deux métaux hétérogènes développe de l'électricité ; ainsi, soudez une lame de cuivre à une lame de zinc, le cuivre devient négatif et le zinc positif ; il appela cette électricité, l'électricité métallique. En 1792, un troisième physicien italien, Fabroni, trouva que les réactions chimiques étaient l'origine de phénomènes électriques indiscutables ; plongez une feuille de zinc dans l'eau acidulée, elle s'oxyde, devient négative, tandis que le liquide dans lequel elle baigne est positif. Galvani, Volta et Fabroni avaient découvert tous les trois une part de vérité : Volta seul en tira gloire et profit, et alors que Galvani mourait sur la paille, son heureux rival inventait la pile et il se voyait comblé des faveurs du premier consul, qui devenait bientôt l'empereur Napoléon. C'est de la pile que datent les



admirables découvertes qui firent de ce siècle le siècle de l'électricité. Je n'essaierai pas de vous faire l'histoire de cette période étonnante, car cela m'entraînerait loin de mon sujet. Mais une ère nouvelle date de Volta ; l'électricité n'était plus étudiée seulement à l'état statique, mais à l'état dynamique, c'est-à-dire sous forme de courant circulant dans les conducteurs.

Comment expliquait-on ce courant ?

D'une manière fort simple encore. Nous retrouvons les deux fluides de Du Fay. Ils sont produits d'une manière incessante et accumulés aux pôles de la pile avec une tension qui dépend de la nature de ses éléments. Cette tension, c'est ce qu'on appelle le potentiel (1). Il y a donc du fluide positif au pôle positif, du fluide négatif au pôle négatif, à un potentiel déterminé.

Réunissons ces deux pôles par un fil conducteur : les deux fluides, doués d'attraction réciproque, se recombinaient. Mais, en vertu de l'activité de la source, les potentiels sont maintenus constants aux pôles et il s'établit dans le circuit un *courant* qui se manifeste par des actions diverses. Ce courant est analogue à un flux de fluide ; son intensité dépend de la différence de potentiel des pôles, c'est-à-dire de la force électromotrice de la pile ; il varie en raison inverse de la résistance du circuit ; plus le circuit est long, plus petite est sa section, plus ou moins conducteur est le métal dont il est formé et plus faible est ce courant. C'est la loi de Ohm,  $I = \frac{E}{R}$ . On peut assimiler le courant à un filet liquide circulant à travers une canalisation. La différence de potentiel ou la force électromotrice est comparable à la pression qui fait couler le liquide d'amont en aval ou à la hauteur de chute ; la résistance est l'analogue des résistances passives, dues au frottement contre les parois ; celles-ci aussi croissent avec la longueur, diminuent quand la section devient plus considérable et varient

---

(1) Voir note A.

avec les rugosités de la paroi. L'intensité du flux dépend, comme l'intensité du courant, de la quantité qui coule dans l'unité de temps.

Vous le voyez, c'est toujours l'idée matérielle d'un fluide dont on estime les quantités, les densités et les épaisseurs.

Cette assimilation a l'immense avantage de peindre quelque chose à l'esprit ; il semble qu'on sache ce qu'est le courant quand on l'attribue à un écoulement d'électricité du pôle positif au pôle négatif.

Ces notions si simples sont universellement répandues aujourd'hui et tellement entrées dans le langage vulgaire que leur vérité ne fait de doute pour personne. Nous-mêmes, dans l'enseignement, nous en faisons constamment usage ; nous disons, comme tout le monde, que la foudre frappe, qu'elle est tombée, que les fluides s'accumulent, qu'ils s'écoulent par les pointes, qu'ils circulent dans les fils, qu'ils décomposent les corps chimiques, etc.

Oserai-je vous avouer que nous n'y croyons nullement ? C'est un comble, me direz-vous ; enseigner ce qu'on ne croit pas, affirmer ce qu'on sait inexact, ce n'est pas le fait d'un homme de science.

Ne vous hâtez pas de juger, et veuillez m'accorder un instant d'attention : il me sera facile de disculper la science des accusations sévères que vous seriez porté à formuler contre elle.

Un exemple me servira mieux que tout un discours.

Newton a découvert les lois de l'attraction universelle. Les corps matériels s'attirent à distance, proportionnellement au produit de leurs masses, en raison inverse du carré de leurs distances. Cette loi si simple a suffi pour expliquer tous les mouvements des astres autour du soleil, considéré comme un centre d'attraction ; jamais elle ne s'est trouvée en défaut ; aucune loi n'a reçu de l'expérience d'aussi nombreuses confirmations. Et cependant, Messieurs, il répugne absolument d'admettre cette action à distance ; il répugne d'autre part d'admettre qu'il y ait une force attractive inhérente à toute particule de matière. Aussi, qu'a dit Newton lorsqu'il a formulé pour la première fois cette loi admirable : « Tout se passe, a-t-il dit, tout se

« passe comme si cette loi était exacte » (1), et c'est ce que nous répétons après lui, en appliquant journellement cette loi. Tout se passe comme si cette loi était exacte.

En électricité, nous disons de même : Tout se passe comme s'il y avait un fluide positif et un fluide négatif ; tout se passe comme s'il y avait entre des fluides de même nom des répulsions à distance ; tout se passe comme si ce fluide avait une tension ; tout se passe comme s'il y avait entre les pôles des piles une différence de potentiel, cause de la force électromotrice ; tout se passe comme si le courant était dû à un transport de ce fluide du pôle positif au pôle négatif.

En réalité, nous n'y croyons pas.

Mais nous le déclarons bien haut.

Ecoutez ce qu'écrivait Coulomb en tête d'un de ses plus beaux mémoires : « Je préviens que, dans la supposition des deux fluides électriques, je n'ai d'autre intention que de présenter, avec le moins d'éléments possibles, les résultats de l'expérience et du calcul, et non d'indiquer les véritables causes de l'électricité ».

Vous pourriez croire que, peu satisfaits de la théorie des deux fluides, nous admettions celle de Franklin, qui ne présuppose qu'une seule nature de fluide : des savants éminents se sont ralliés à cette manière de représenter les faits, mais nous ne saurions y voir plus que ce que ne le disait Coulomb ; c'est une tentative de simplification des calculs, et rien de plus.

L'électricité n'est assurément pas un fluide.

L'esprit humain a une tendance marquée à expliquer les phénomènes de la nature de la manière la plus simple. Pendant bien des siècles, on a expliqué les phénomènes calorifiques et lumineux en admettant l'existence d'une matière subtile, impondérable, qui imprégnait les corps et les rendait chauds et lumineux. Le soleil nous

---

(1) *Quam ego attractionem appello, fieri sane potest, ut ea efficiatur impulsu, vel alio aliquo modo nobis ignoto.*

chauffait et nous éclairait par une émission de matière calorifique et lumineuse ; le feu était brûlant, parce qu'il était formé presque uniquement de cette matière ignée ; la glace en était dépourvue. La propagation de la chaleur était due à une sorte de courant de matière ignée ; et ainsi de tous les autres phénomènes.

De grands savants discutèrent longtemps la question de savoir si cette matière ignée était pesante.

Les uns constatèrent qu'elle l'était ; un autre, Fordyce d'Aberdeen, mort seulement en 1802, lui trouva un poids négatif ; Lavoisier s'en mêla aussi, et il affirma que la matière ignée ne pesait rien.

Voilà où en étaient les choses quand Rumford, Davy, Montgolfier, Grove, Séguin et quelques autres découvrirent qu'il y avait une relation indiscutable entre la chaleur et le mouvement. On chercha dans la mécanique la clef de l'énigme. Comment pouvait-on rendre compte autrement des quantités indéfinies de chaleur qu'on développe par le frottement de deux corps ? Comment expliquer qu'un travail mécanique peut créer du calorique ? Quelle justification donner des chaleurs latentes qui disparaissent dans les changements d'état ? Il fallait bien abandonner l'hypothèse de la chaleur-matière pour adopter celle de la chaleur-mouvement. Les découvertes de Fresnel vinrent d'autre part démontrer que la lumière n'était pas, elle non plus, une substance, mais un accident, une manière d'être.

Aujourd'hui nous savons d'une manière indubitable que les phénomènes de chaleur et de lumière sont dûs à des mouvements oscillatoires spéciaux des dernières particules de la matière, se transmettant dans l'espace par l'intermédiaire d'un fluide subtil, impondérable, remplissant tout, qu'on appelle l'éther. Il reste quelques difficultés de concilier les propriétés de cet éther avec l'immense variété des phénomènes, mais le fait fondamental reste acquis, la chaleur et la lumière sont le résultat d'une manière d'être et non pas l'action d'une substance spéciale.

Ces découvertes doivent nous éclairer dans l'étude de l'électricité.

Il y a, en effet, des relations nombreuses de dépendance entre la chaleur, la lumière et l'électricité. Un courant électrique échauffe, au point de le rendre lumineux, un conducteur résistant ; réciproquement, la chaleur engendre des courants dans une pile thermo-électrique. Un rayon de lumière modifie la conductibilité du sélénium et cette propriété a été utilisée pour construire le photophone. Kerr a démontré que le verre et certains liquides devenaient biréfringents, comme le spath, sous l'influence de l'étincelle d'induction ; un aimant puissant fait naître dans les corps transparents des phénomènes particuliers connus sous le nom de polarisation rotatoire ; la lumière ne se réfléchit plus de même sur un miroir de fer, après qu'il est devenu magnétique. Bref, les points de contact sont devenus nombreux et voici que récemment on a constaté que la capacité inductive des diélectriques est égale au carré de leurs indices de réfraction. Enfin, M. Rowland vient de démontrer que l'induction se propage avec la même vitesse que la lumière, soit avec une vitesse de 300000 kilomètres par seconde.

Les relations de l'électricité avec la chaleur et la lumière sont donc indéniables, et les progrès de la science confirment les prévisions formulées par Faraday, en 1845, alors qu'il déclarait que « ce grand pouvoir de la nature, qui se manifeste par des phénomènes particuliers, sous des formes particulières, révèle une fois de plus son identité par les relations directes de sa forme lumière avec la forme électricité et magnétisme ».

Il faut bien admettre dès lors que l'électricité est, comme la chaleur et la lumière, non pas une substance, ni un fluide, mais une manière d'être spéciale. L'identité des vitesses de la lumière et de l'induction dans les gaz prouve à l'évidence que cette *manière d'être* se propage par le même éther que les phénomènes calorifiques et lumineux.

Mais pourrions-nous dire ce qui caractérise cette manière d'être ?

M. Clerck-Maxwell a tenté de résoudre ce problème. Les phénomènes lumineux sont produits par les vibrations des derniers éléments des corps ; un milieu élastique, continu, l'éther, sert de véhi-

cule à ce mouvement vibratoire ; cet éther pénètre tous les corps et il remplit même l'espace vide de matière. Les phénomènes électriques sont le résultat de mouvements analogues des dernières particules des corps, transportés à distance par le même éther ; mais ces mouvements ne sauraient être un simple mouvement vibratoire , attendu qu'ils ne pourraient donner pour résultante extérieure un mouvement de translation , comme nous le constatons par l'expérience. La vibration est nécessairement accompagnée d'un glissement de l'éther, qui s'opère dans le sens de la propagation de l'électricité. Voilà pourquoi l'électricité se manifeste toujours à nous sous l'apparence d'un flux ; voilà pourquoi nous constatons une résistance aux courants et un échauffement des sections réduites des circuits, alors que nous n'observions rien de semblable dans l'étude des phénomènes calorifiques.

Le courant serait donc un mouvement de la matière impondérable au sein de la matière pondérable.

Maxwell a soumis ces hypothèses au calcul et sa première tentative a été couronnée d'un succès relatif. Peut-être l'électricité trouvera-t-elle en lui son Fresnel ?

L'apparition d'un tel génie marquerait l'aurore d'une ère nouvelle : il viendra certainement, mais à son heure, à l'heure choisie par la divine Providence, qui accorde à chaque siècle ce que réclament les besoins de l'univers. Cette pensée, sur laquelle nous reviendrons maintes fois, n'est pas de nous, elle est de Tertullien.

---

Les doctrines nouvelles, que nous venons d'exposer, sont fondées sur la considération de l'unité des forces physiques : elles nous paraissent constituer un progrès notable de la science, mais nous reconnaissons qu'elles ne s'imposent pas encore absolument ; aussi dirons-nous avec le poète latin :

.... . *Si quid novisti rectius istis,  
Candidus imperti ; si non, his utere mecum.*

Consacrons la fin de cette conférence à faire ressortir l'admirable fécondité de ces aperçus si larges ; les conséquences que nous en déduirons seront un argument puissant en leur faveur.

« Les époques où l'on a ramené à un principe unique les phénomènes considérés auparavant comme dûs à des causes différentes ont été, presque toujours, accompagnées de la découverte d'un très grand nombre de faits nouveaux, parce qu'une nouvelle manière de concevoir les causes suggère une multitude d'expériences à tenter et d'explications à vérifier ». Ampère écrivait ces lignes en 1824 ; il semble qu'il ait eu une vision prophétique de l'avenir.

C'est la théorie mécanique de l'électricité, considérée comme un mode de mouvement, qui a produit les résultats dont nous sommes les heureux témoins : elle a permis en même temps de réunir en une synthèse lumineuse tous les phénomènes électriques.

Passons en revue les faits principaux constatés par l'expérience, en suivant l'électricité depuis sa genèse jusqu'à son utilisation définitive : nous verrons, suivant la formule du P. Secchi, tous les phénomènes magnétiques et électriques, « prendre leur origine dans le mouvement et s'y résoudre. »

Comment peut-on produire de l'électricité ?

Par le frottement. En réalité, l'électrisation par le frottement n'est qu'un cas particulier d'un fait plus général découvert par Volta : le contact seul de deux corps hétérogènes suffit pour produire entre eux une différence de potentiel ; elle n'est pas utilisable, il est vrai, pour alimenter un courant, parce que le courant est un transmetteur d'énergie et que l'énergie ne saurait être créée sans une dépense équivalente. Mais renouvez les contacts en dépensant le travail nécessaire pour séparer les deux corps qui s'attirent, en vertu même de leurs charges de noms contraires ; en d'autres termes, frottez-les l'un contre l'autre : la quantité d'électricité accumulée sur les conducteurs sera proportionnelle au nombre des tours de roue d'une machine Ramsden, c'est-à-dire qu'elle est proportionnelle au travail dépensé.

La pression est aussi une source d'électricité ; pressez un cristal



de spath entre vos doigts, il sera d'autant plus électrisé que vous l'aurez plus fortement comprimé.

Vous électriserez encore un cylindre de soufre en le râclant, un bâton de cire d'Espagne en le brisant, une feuille de mica, en la clivant. Inutile de faire observer que, dans tous ces exemples, nous voyons l'électricité produite par la dépense d'un certain travail.

Au lieu de recourir au frottement ou à la pression pour engendrer de l'électricité, on peut utiliser certains phénomènes d'influence. Voici un corps électrisé ; c'est, par exemple, un gâteau de résine qui a été battu à l'aide d'une peau de chat. Approchez-en un disque, mis en communication avec le sol ; ce conducteur se chargera par influence d'électricité de signe contraire ; qu'on supprime alors la communication avec le sol et qu'on soulève le conducteur, on en tirera une longue étincelle. Cette opération pourra être répétée un grand nombre de fois, et il semble que l'on puisse, avec une même quantité d'électricité primitive, en produire une quantité indéfinie : ce n'est pas étonnant, parce que vous achetez chaque étincelle au prix de la dépense de travail nécessaire pour séparer le disque du gâteau et le soulever à une certaine hauteur. En réalité, votre travail se transforme en électricité, et plus vous travaillerez, plus vous recueillerez d'électricité.

C'est l'électrophore de Volta que nous venons de décrire ; Holtz n'a fait que modifier la forme de l'instrument primitif, et vous savez quels remarquables effets l'on peut obtenir avec cette ingénieuse et bien mystérieuse machine. Carré, Bertsch, Tœpler, Voos, Thomson, Wimshurst ont copié et plus ou moins perfectionné le modèle de Holtz.

Armstrong a tiré parti du travail disponible dans la détente de la vapeur ; Thomson a fait fonctionner un autre appareil par l'écoulement de l'eau ; toujours nous voyons dépenser du travail ou de l'énergie pour recueillir de l'électricité.

Il y a d'autres générateurs, ceux de l'industrie, les magnétos et dynamos de Gramme, Siemens, Brush, Meritens, etc., etc. Là, une

bobine de fil conducteur se meut devant un pôle d'aimant, c'est-à-dire dans un champ magnétique. Ce mouvement suffit pour établir une différence de potentiel entre les extrémités du fil. Mais il ne pourra être entretenu qu'en faisant un effort déterminé, car, suivant la loi de Lenz, les courants induits tendent à détruire le mouvement qui leur a donné naissance.

En somme, tous ces générateurs d'électricité sont des générateurs mécaniques, et l'on pourrait chercher à déterminer quelle quantité d'électricité est produite par kilogrammètre.

A côté de ces machines il existe d'autres sources, bien différentes en apparence, dans lesquelles il suffit de chauffer certaines soudures métalliques pour faire naître un courant ; on les appelle des piles thermo-électriques. Telles sont les piles de Becquerel, de Marcus, de Clamond, de Noë, de Chaudron, etc. ; ici l'électricité est le prix d'un nombre déterminé de calories. Or, la chaleur, c'est de l'énergie, c'est-à-dire du travail en puissance, ainsi que M. Kolb, vice-président de notre Société, vous l'expliquait naguère, avec une lumineuse simplicité et une exactitude mathématique (1). Chaque calorie équivaut à 425 kilogrammètres.

Qui ne connaît enfin les piles hydro-électriques, si variées dans leurs formes, dans leur composition et dans la disposition de leurs éléments ? Elles sont innombrables, mais nous retrouvons toujours le même métal à leur pôle négatif, le zinc : qu'il baigne dans un liquide acide ou alcalin, ce zinc se consume, il se consume avec dégagement de chaleur, *il brûle*, en d'autres termes. La pile est donc un véritable foyer alimenté au zinc ; la quantité d'électricité produite est proportionnelle à la quantité de zinc consommé et au nombre de calories dégagées, partant au travail disponible.

Toujours, nous voyons l'électricité achetée au prix d'une dépense de travail ou d'énergie (2).

---

(1) Principe de l'énergie et ses conséquences, par M. J. Kolb, *Bulletin* tome XIV, page 193.

(2) Voir note B.

Ce premier point établi, étudions les effets de l'électricité.

Dirigeons un courant dans une de ces machines qui tout-à-l'heure nous servaient à transformer le travail en électricité ; par une loi de réciprocité merveilleuse, cette même machine est apte à transformer à son tour l'électricité en travail mécanique, et je vous montre non-seulement une machine dynamo, actionnée par une magnéto de Gramme, mais encore une machine de Tœpler, commandée par une machine de Holtz ; cette expérience peu connue vous montre le lien de fraternité qui existe entre ces deux branches de l'électricité, qu'on sépare à tort, l'électrostatique et l'électro-dynamique. La transmission de la force motrice est donc une fonction essentielle de l'électricité : vous savez les applications qui en ont été faites par MM. Fontaine et Deprez et les résultats obtenus à Munich, à Grenoble, à Paris et à Creil.

Mais l'électricité ne transporte pas seulement à distance le travail mécanique, elle transmet l'énergie sous toutes ses formes : un courant fait rougir un fil de platine il rend incandescent un filament de carbone, il produit un arc éblouissant entre deux pointes de charbon et on utilise la température élevée qu'il produit pour fondre les corps les plus réfractaires. Ce même courant provoque des réactions chimiques, forme des composés nitreux, fait naître l'ozone ; d'autre part, s'il traverse un composé chimiquement décomposable, il dissocie ses éléments, et porte le métal de sa base au pôle négatif : c'est ainsi qu'on fabrique le magnésium, qu'on recouvre les métaux d'or, d'argent et de nickel, et enfin qu'on dépose le cuivre en couches épaisses au fond d'un moule. Une industrie nouvelle se crée, le traitement électrolytique des minerais d'argent, de cuivre et de zinc. En tout cela, nous reconnaissons encore cette fonction universelle de l'électricité, le transport de l'énergie. Ajouterons-nous enfin, que ce mystérieux agent ne transmet plus seulement la pensée et l'écriture, mais la parole elle-même de Paris à Bruxelles, en attendant que ce soit de Cadix à Moscou ?

En un mot, le nombre des sources d'électricité est égal au nombre

des formes diverses de l'énergie et les applications de l'électricité sont aussi variées que les formes de l'énergie.

Le rôle de l'électricité est donc de transmettre l'énergie.

L'électricité transmet l'énergie partout. Que fait le médecin quand il demande à la pile la guérison de certaines maladies, pour lesquelles il a épuisé sans succès toutes les ressources de son art? Voyez cet enfant au teint pâle, aux joues creuses, aux formes chétives; il se meurt de langueur et d'anémie. Demain, peut-être, il ne sera plus; de la vie, il n'aura connu que le printemps, et quel printemps! Essayez l'électricité; placez-le sur un tabouret isolant et mettez-le en communication avec les conducteurs d'une puissante source d'électricité de manière à l'en imprégner et à le faire nager dans une atmosphère d'électricité. Répétez ce *bain* tous les jours: quelle modification bientôt dans tout son être! Les joues se colorent, les fonctions se régularisent,, il semblerait qu'on ait transfusé à cet enfant un sang nouveau: quelques semaines de ce traitement opèreront ce que n'avait fait aucun tonique, aucune pilule, ni le fer, ni aucun reconstituant; vous avez reconstitué la vie dans ce corps éteint en y portant l'énergie qui lui manquait. Et de même vous régénèrerez un muscle, vous fortifierez le système nerveux et vous conjurerez les conséquences fatales d'une lésion de nutrition. Quel est le mécanisme de cette action? Je l'ignore aussi bien que les empiriques qui l'utilisent; mais qu'importe, M. le D<sup>r</sup> Boudet de Paris, à qui j'emprunte cette idée, me paraît avoir trouvé la vraie formule de l'électro-thérapie.

Ces considérations suffisent pour nous faire toucher du doigt le rôle de l'électricité, et pour nous donner sa seule définition: c'est un *transmetteur d'énergie*, dont l'action est subordonnée au grand principe de la conservation de l'énergie. Tout le travail, toute l'énergie exigée pour la production de l'électricité se retrouve dans l'énergie répartie, distribuée et transformée par elle. L'énergie est impérissable; elle ne peut être détruite; elle subsiste toujours, indépendamment de sa forme.

C'est par elle que nous pourrons mesurer l'électricité, ainsi que nous le verrons dans notre prochain entretien.

## DEUXIÈME CONFÉRENCE.

---

### MESURE DES GRANDEURS ÉLECTRIQUES.

---

MESSIEURS,

Constatons d'abord l'étendue du chemin que nous avons parcouru dans notre première conférence : nous y avons étudié la nature et le rôle de l'électricité, d'après les doctrines les plus récentes, fondées sur la considération de l'unité des forces physiques et sur le principe de la conservation de l'énergie.

L'électricité, avons-nous dit, n'est point un fluide, ce n'est point une matière, ce n'est point une substance, c'est une manière d'être, ce que les philosophes appellent un accident : c'est un mode de mouvement particulier, analogue à celui qui constitue les ondes sonores, calorifiques et lumineuses, avec cette différence toutefois qu'il n'affecte ni l'ouïe, ni le toucher, ni la vue. Pour percevoir l'électricité, il nous faudrait un sixième sens : peut-être certains animaux sont-ils doués de ce sens, de même que le pigeon et l'hirondelle ont le sens magnétique, de même que certains hommes sont sensibles aux phénomènes de suggestion. À défaut de tout organe électrique, nous sommes obligés de recourir à des moyens indirects pour connaître l'existence de l'électricité, appareils mécaniques, vases à réactions chimiques, thermomètres sensibles ou autres instruments servant de galvanos-

copes et de galvanomètres. En somme, c'est toujours par la production d'un travail que l'électricité se manifeste, travail mécanique, travail chimique, travail physique, énergie calorifique, son ou lumière. Ce fait est capital, car il nous montre que le rôle de l'électricité n'est autre que de distribuer, de répartir, de transformer et de transmettre l'énergie. Une fois en possession d'une notion aussi simple, nous n'avons pas à chercher plus longtemps ce qu'est l'électricité : abandonnez, vous disais-je, aux métaphysiciens les vaines et subtiles discussions sur la nature intime des choses : renoncez à définir l'électricité par son essence, que nous ne saurions pénétrer, mais définissez-la par sa fonction, qui est évidente. En se développant, l'électricité emmagasine l'énergie ; elle la restitue après l'avoir transportée au loin. C'est donc un transmetteur d'énergie.

Reprenant une idée du D<sup>r</sup> Boudet de Paris, je vous déclarais que cette manière de voir pourrait jeter un jour nouveau sur l'électrothérapie : le traitement électrique porte l'énergie aux sources de la vie, c'est l'équivalent de la transfusion d'un sang généreux. Des objections ont été faites par quelques-uns de mes collègues les plus distingués de la Société contre cette théorie, m'a-t-on dit ; ils auraient demandé plaisamment pourquoi on ne chauffait pas les malades pour leur communiquer l'énergie qui leur fait défaut : la chaleur n'est-elle pas une forme de l'énergie ? c'est vrai, mes chers collègues ; mais je vous demanderai à mon tour pourquoi vous ne chaufferiez pas une machine de Gramme pour la faire mouvoir ? Votre argument s'appliquerait à cette machine aussi bien qu'à la machine animale. Vous avez vu, dans ma première conférence, qu'un fil de platine, placé dans le circuit entre une génératrice et une réceptrice, passait au rouge lorsque l'énergie transmise par le courant n'était pas transformée en travail mécanique par la génératrice ; eh bien, croyez-vous qu'en chauffant ce fil au rouge, à l'aide d'une flamme de gaz, vous feriez tourner cette réceptrice ? Essayez ces deux expériences, vous verrez que l'énergie calorifique ne se transforme en travail que dans des conditions déterminées. Tous les cycles ne sont pas réversibles, tou-

tes les transformations ne sont pas réciproques ; votre objection m'a donné l'occasion de le faire constater et j'ai mille raisons de vous en remercier.

Ces considérations de transport d'énergie peuvent faciliter beaucoup l'étude de l'électricité, car elle est toujours le prix d'une dépense d'énergie et l'équivalent d'un travail mécanique : il en ressort que le travail est un terme commun de comparaison pour tous les phénomènes électriques, et que par suite ils peuvent tous être estimés en fonction des unités de la mécanique. C'est le fondement de cet admirable système dynamique des unités électriques, proposé en 1862, par l'Association britannique, sanctionné en 1881 par le Congrès international des électriciens et adopté généralement depuis lors, au grand profit de la science pure et des applications industrielles de l'électricité.

L'histoire de cette création mériterait d'être racontée ici : je ne peux que vous en signaler un aperçu qui est du plus haut intérêt. Les mesures électriques précises ont été nécessitées par les progrès de l'industrie des télégraphes et des câbles sous-marins ; ce sont des ingénieurs qui ont su les effectuer et les rendre pratiques ; des négociants ont donné aux unités leur valeur commerciale et leur grande notoriété ; les savants ont enfin coordonné le système et harmonisé ses divers éléments. C'est ainsi que progressent les sciences par le concours de tous. Autrefois, la théorie pure avait des grand'prêtres en cravate blanche, très solennels, voire même un peu pédants, qui regardaient de haut ceux qui cultivaient la science en vue de ses applications ; ceux-ci, ingénieurs instruits, forts d'une situation officielle ou acquise, n'appréciaient pas assez une troisième catégorie de travailleurs, obligés, pour soutenir le rude combat de l'existence, de tirer parti des découvertes nouvelles et de greffer des affaires sur des résultats scientifiques.

Des castes, impitoyablement formées, croyaient avoir le monopole du savoir, de l'intelligence et du génie pratique, et, dans cette hiérarchie artificielle, le dédain descendait de haut en bas et la critique

remontait de bas en haut, empruntant quelquefois une grande autorité au nom de celui qui la formulait. A l'Exposition d'électricité de 1881, un conférencier vint expliquer la machine de Gramme au public très mêlé qui fréquentait le salon de lectures : ce fut un feu d'artifice de Volts et d'Ampères, et les auditeurs durent en être pour le moins éblouis, sinon éclairés. Un bon bourgeois s'avance vers l'orateur à la fin de la séance et lui demande avec une grande simplicité : « Est-ce là la machine de Gramme ? — Oui, Monsieur, » et le conférencier recommence sa théorie avec complaisance en émaillant de nouveau son discours des mots les plus sonores. Son interlocuteur l'écoutait patiemment ; quand ce fut fini, il sourit finement, et dit à mi-voix : « Je suis Gramme, l'inventeur de la machine ; je vous affirme que tous ces grands mots ne m'ont pas servi pour faire ma découverte ». Cette anecdote est certainement controuvée, mais elle a couru les journaux et elle témoigne du mauvais esprit qui anime certains critiques jaloux de la science. A les entendre, les savants n'auraient découvert que des théories creuses : toutes les inventions qui ont signalé les vingt dernières années seraient dues à des praticiens de génie. C'est bien mal connaître l'histoire de l'électricité. Thomson et Siemens, Helmholtz et Hafner-Alteneck, Jamin et Bréguet, Planté et Faure, Marcel Deprez et les de Rothschild eux-mêmes, ont développé l'électricité aussi bien que Gramme, Edison et Jablochkoff et tous les autres inventeurs de fortune dont le nom est connu des deux mondes. L'établissement du système dynamique des unités électriques n'a pas eu moins d'importance pratique que la découverte du téléphone et de la lampe à incandescence, je n'hésite pas à l'affirmer ; eh bien, c'est une œuvre collective, et je devais vous le faire remarquer avant d'en commencer l'exposé. Ce sont les besoins de l'industrie qui ont renouvelé les formes de la pensée et du langage ; mais on n'a fait que transporter du laboratoire dans le domaine de la pratique des idées qui étaient nées dans l'esprit de quelques théoriciens éminents et qui y avaient germé, jusqu'au moment où sonna l'heure providentielle.



Après avoir rendu à César ce qui appartient à César, abordons l'étude de cet admirable système d'unités.

Une réforme était urgente dès 1862 : pour ne citer qu'un exemple il y avait alors neuf unités de résistance, celles de Thomson, de Jacobi, de Weber, de Siemens, de Mathiessen et de Varley, l'unité télégraphique allemande, deux unités françaises de Digney et de Bréguet. Or, l'accord n'était même pas fait pour chacune de ces unités et le weber allemand ne valait que le dixième du weber anglais ; M. Helmholtz a avoué fort ingénument depuis qu'il les avait longtemps confondus. De plus, aucun lien ne rattachait l'unité de résistance à l'unité de force électromotrice et d'intensité : la confusion la plus regrettable régnait donc en électricité, et l'on ne s'y entendait pas mieux qu'au pied de la tour de Babel.

L'Association britannique essaya de corriger ce déplorable état de choses, par une série de recherches dont les résultats ont été publiés dans les *Proceedings of the Royal Society*, de 1862 à 1867. On trouvera sur cette question les détails les plus intéressants dans le traité de M. Fleeming Jenkin intitulé : *Electricity and Magnetism*.

Avant tout, il s'agissait d'adopter des unités fondamentales desquelles toutes les autres pussent dériver, de même que le gramme, le stère, l'are et le franc dérivent du mètre. Ces unités pouvaient être ce qu'on voudrait, mais il fallait qu'elles fussent invariables et que tout le monde voulût bien les accepter.

Or, trois éléments interviennent dans tous les phénomènes physiques en général : l'espace, le temps et la matière ; trois unités joueront donc un rôle universel dans les mesures électriques, les unités de longueur, de temps et de masse. On eût pu adopter le pied anglais, la masse d'une livre anglaise et la seconde. La tentation était grande pour un peuple jaloux comme le sont nos voisins d'Outre-Manche. L'Association britannique donna sagement la préférence aux unités métriques et elle choisit le centimètre, la masse du gramme et la

MUSEE  
COMMERCIAL  
LILLE

seconde. Ce système est indiqué par le symbole C. G. S. (centimètre-gramme-seconde).

Le centimètre et la seconde n'ont pas besoin d'être définis, mais vous pourriez être embarrassés par cette unité de masse, que nous avons appelée la masse du gramme, et quelques explications sont nécessaires à ce sujet.

Dans le langage vulgaire, on désigne sous le nom de masse la quantité de matière contenue dans un corps : cette définition n'a aucun sens précis. Qu'est-ce que la matière ? C'est une chose que tout le monde croit connaître, dit M. Joubert, et que personne ne connaît, une entité qui se cache sous les apparences phénoménales et en constitue le fond, dont une Ecole fait le Dieu de l'Univers, tandis qu'une autre ne lui reconnaît même pas l'existence : la matière ne saurait définir la masse. On dit encore que la masse résulte du nombre d'atomes que les corps renferment. S'il n'y avait dans l'univers qu'une seule espèce d'atomes, on pourrait concevoir ce qu'il faut entendre de la sorte ; mais, le nombre des corps simples étant très considérable, cette définition pêche encore et il faut nécessairement en chercher une autre. La mécanique nous la donnera.

On constate expérimentalement les différences de masse de plusieurs corps par la grandeur de l'effort qu'il faut développer pour leur communiquer la même vitesse dans le même temps. La masse dépend donc à la fois de l'effort exercé et de la vitesse qui en est la conséquence, au bout de l'unité de temps. Elle est d'autant plus forte que le premier est plus considérable et d'autant moindre que la seconde est plus grande. En d'autres termes, elle est directement proportionnelle à la force et inversement proportionnelle à l'accélération. Que cette force soit l'action de la pesanteur et l'accélération celle de la chute libre, nous pourrions écrire que la masse  $m = \frac{P}{g}$ , c'est-à-dire qu'elle est égale au quotient du poids du corps par l'accélération due à la pesanteur qui est de 981 centimètres. Ce rapport demeure invariable : il définit donc bien la masse.

Or, nous prenons comme unité de masse celle du gramme, soit la masse d'un centimètre cube d'eau distillée, à une température de quatre degrés.

De ce choix résulte la détermination de l'unité de force, puisque la masse est fonction de la force; c'est une unité *dérivée*.

La force unité est celle qui, agissant sur l'unité de masse, lui imprime l'unité d'accélération, soit une accélération de 1 centimètre par seconde : on a appelé cette unité de force la *dyne*. La dyne est conséquemment la 981<sup>e</sup> partie du gramme, puisqu'un gramme produit une accélération de 981 centimètres : c'est à peu de chose près un milligramme.

L'unité de travail est définie de même par ce qui précède ; c'est le travail développé par une dyne, pendant un parcours de 1 centimètre, soit un cent-millionième environ (exactement un 98.100.000<sup>e</sup>) de kilogrammètre, le travail d'une mouche montant le long d'une vitre, a dit M. Lippmann. Cette unité eût du s'appeler la dyne-centimètre : on a préféré lui donner un nom tiré du grec et on l'a nommée un *erg*. Le cheval vapeur de 75 kilogrammètres contient près de 7 milliards et demi d'ergs : ce n'est pas en ergs qu'on estimera le travail d'une machine marine, mais pour les électriciens, c'est une unité pratique (1).

Tel est le système d'unités C.G.S. : il ne se compose que d'unités mécaniques, jusqu'ici, dont on se rend très facilement compte. Dans tout cela, il n'y a rien à comprendre, et, en tous cas, cet ensemble est aussi facile à saisir que le système métrique. Retenez seulement que toutes ces grandeurs sont à évaluer en centimètres, en masse-grammes, en secondes, en dynes et en ergs. Je suis convaincu que tout le monde m'a suivi dans cette première étape.

L'application du système était immédiate pour le magnétisme.

---

(1) Voir ci-après note G.

La loi fondamentale du magnétisme a été formulée par Coulomb, dans les termes suivants :

« Des pôles magnétiques de même nom se repoussent, de nom contraire s'attirent, avec une force qui est proportionnelle au produit des quantités de magnétisme en présence  $m$  et  $m'$ , et en raison inverse du carré de la distance  $r$  qui les sépare. Cette force a donc pour expression :

$$\pm \frac{m m'}{r^2}$$

Mais je vous entends me dire : « Vous parlez de quantité de magnétisme ? Le magnétisme, qui n'est pas non plus un fluide, ni une substance, ne peut se mesurer, se jauger, ni se peser ».

Pardonnez : je concède que ce mot de quantité soit discutable, mais, je vous l'ai expliqué longuement, nous usons du mot sans croire à la chose : nous disons quantité de magnétisme comme nous disons quantité de chaleur, et nous mesurons cette quantité par ses effets dynamiques.

L'unité de quantité de magnétisme est celle qui, agissant sur une quantité égale, placée à la distance de 1 centimètre, exerce sur elle une force égale à une dyne.

Nous irons plus loin.

La région qui entoure un pôle d'aimant est appelée un *champ magnétique* : la terre, qui joue le rôle d'un aimant, constitue à sa surface un champ magnétique, dont il importe de savoir estimer l'intensité.

Mais, ici encore, comment peut-on mesurer cette intensité ?

Nous la mesurerons en unités C.G.S. L'intensité d'un champ magnétique est définie en un point par le nombre de dynes qui s'exercent sur le pôle unité placé en ce point. C'est ainsi qu'on sait qu'en ce moment, la composante horizontale de l'intensité du champ

magnétique terrestre est égale à Lille à 0,190 unités C.G.S. (1).

Ces exemples vous ont préparés à l'application du système C.G.S. aux mesures électriques.

---

Quelles sont les grandeurs électriques dont on ait surtout à s'occuper ?

Elles sont au nombre de cinq : la quantité,  $Q$ , la force électromotrice,  $E$ , l'intensité du courant,  $I$ , la résistance du conducteur,  $R$ , et la capacité,  $C$ .

Toutes ces dénominations sont empruntées à l'ancienne théorie matérielle de l'électricité. Elles deviendraient inintelligibles si vous n'admettiez pas qu'un courant électrique soit un véritable flux d'électricité. L'électricité coule en vertu d'une différence de pression : cette différence de pression électrique, de potentiel, c'est l'origine de la force électromotrice ; elle produit le courant comme une différence de niveau détermine un courant d'eau, comme une différence de pression détermine un courant de gaz, comme une différence de température détermine un flux de chaleur. Le circuit oppose une résistance au courant électrique de même que les parois d'une conduite présentent une certaine résistance au mouvement d'un fluide. Il se débite de l'électricité comme il se débite de l'eau, et l'on en mesure la quantité ; l'intensité du courant dépend du débit par seconde, c'est-à-dire du quotient de  $Q$  par le temps  $t$  :

$$I = \frac{Q}{t}.$$

Enfin, la capacité s'entend d'elle-même : c'est la quantité d'élec-

---

(1) Ainsi que je l'ai démontré récemment, l'intensité horizontale diminue considérablement dans les édifices et surtout dans les constructions métalliques : j'ai trouvé dans telle pièce de mon laboratoire une valeur moindre que 0,115 unités C.G.S.

tricité que peut contenir un condensateur, quand il a été chargé par l'unité de force électromotrice. La capacité est donc égale au quotient de  $Q$  par  $E$  :

$$C = \frac{Q}{E}.$$

Rappelons encore la loi de Ohm que je vous démontrerais dans notre premier entretien : l'intensité d'un courant est proportionnelle à la force électromotrice qui la produit, et en raison inverse de la résistance du conducteur qu'il traverse :

$$I = \frac{E}{R}$$

Ces grandeurs sont donc dépendantes les unes des autres, en vertu des équations qui précèdent : elles formeront un système cohérent.

Comment pourrions-nous les évaluer en fonction des unités C.G.S ? N'oubliez pas que ces unités sont dynamiques : c'est donc par un travail qu'il faut nous y rattacher.

Or, Joule a démontré que lorsqu'un courant d'intensité  $I$ , traverse pendant un temps  $t$ , un fil de résistance  $R$ , il produit une quantité de chaleur proportionnelle au produit  $I^2 R t$  ; comme  $IR = E$ , on peut écrire  $E I t$ , ou encore  $E Q$ , puisque  $Q = I t$ . La chaleur dégagée par le passage d'une quantité  $Q$ , mise en mouvement par une force électromotrice  $E$ , nous est donc connue, et par suite le travail équivalent, attendu que chaque calorie vaut 425 kilogrammètres. Nous possédons donc une relation entre la force électromotrice, la quantité et le travail disponible dans le courant, et voici que nous entrons dans les mesures dynamiques. Curieuse coïncidence : ce travail est proportionnel au produit d'une quantité d'électricité par une différence de potentiel, de même que le travail d'une chute d'eau dépend de la hauteur de chute et de la quantité d'eau tombée. Les analogies se poursuivent jusqu'au bout entre l'électricité et les fluides en mouvement !

Nous trouvons un autre lien entre les grandeurs électriques et les unités dynamiques : un courant électrique a la propriété de produire, comme un aimant, un champ magnétique : ainsi, un courant d'intensité  $I$ , de longueur  $L$ , exerce sur une quantité  $m$  de magnétisme placée à une distance  $r$ , une force  $f$  égale à

$$f = \frac{ILm}{r^2}.$$

Voilà donc un travail et une force mesurable, et, en somme, cinq équations relient les cinq grandeurs : le système des unités sera établi, pourvu que nous définissions une seule des cinq unités.

Rien de plus facile.

Supposons un circuit circulaire, ayant un centimètre de longueur de rayon égal à l'unité, agissant sur une masse de magnétisme placée en son centre, c'est-à-dire à une distance  $un$  de tous ses éléments, égale elle-même à l'unité de quantité magnétique, et convenons de prendre pour unité d'intensité celle d'un courant dont l'action serait, dans ces conditions, égale à une dyne.

Le système des Unités Electromagnétiques C.G.S. est fondé.

Aussi simple que le système métrique, il est aussi utile aujourd'hui, et je ne vois pas pourquoi on ne l'enseigne pas dans les écoles primaires.

---

Nous sommes maintenant exactement dans la situation de la France en novembre 1793, après que la Convention Nationale eut décrété en principe l'unification des poids et des mesures, en prenant pour base du nouveau système une longueur invariable, naturelle, retrouvable si elle venait à être perdue, la quarante millionième partie du méridien terrestre. Jamais aucun peuple n'avait été doté d'un système aussi rationnel et aussi pratique ; et cependant, voyez-vous l'étonnement du français auquel on serait venu dire que, désormais, on ne mesurerait plus à l'aune, ni à la toise, mais à la quarante millionième partie du méridien terrestre !

Vous êtes assurément sous la même impression.

Après avoir défini l'unité d'intensité de courant, je me suis écrié que le système était fondé ; vous vous demandez si j'ai voulu parler sérieusement.

Vous le reconnaîtrez dans un instant.

Que restait-il à faire à la Commission des poids et mesures, après le décret de la Convention ? Deux choses : il fallait d'abord créer des multiples et des sous-multiples de l'unité fondamentale choisie, les proportionner aux grandeurs usuelles et les nommer ; en second lieu, il fallait mesurer le méridien pour en prendre la quarante millionième partie. On commença donc par déduire du mètre, le millimètre, le kilomètre et le myriamètre, l'are, l'hectare, le stère, le gramme et le kilogramme, etc. ; noms que nos pères trouvèrent bien étranges, et qui sont pour nous bien naturels. Cela fait, Borda, Delambre, Méchain mesurèrent un arc de méridien entre Dunkerque et Barcelone et le comparèrent aux résultats de l'abbé Lacaille, de La Condamine de Clairaut et des autres ; on put donner ainsi au mètre une forme concrète ainsi qu'au kilo, une forme que tout le monde pût voir et reproduire, et qui a été conservée à l'Observatoire comme un prototype de la plus grande valeur, que toutes les nations sont venues copier.

Faisons ce travail, et commençons par adapter les unités à leur emploi : le mètre cube eût été une bien grosse unité de volume, et la tonne une formidable unité de poids, qu'il a fallu réduire ; de même les unités de quantité, d'intensité et surtout celles de capacité étaient trop considérables et on en a choisi un sous-multiple pour unité pratique. Les unités de résistance et de force électromotrice ont dû être multipliées au contraire. Cela fait, on a donné des noms à ces unités pratiques.

L'unité de résistance a été prise égale à mille millions de fois l'unité de résistance et on l'a appelée *ohm* ; on l'écrit  $10^9$  C.G.S.

Le *volt*, (en souvenir de Volta) est l'unité de force électromotrice, égale à  $10^8$  unités C.G.S, ou à 100 millions.



On a appelé *ampère* le courant produit par le volt dans un circuit ayant un ohm de résistance : il vaut un dixième d'unité C. G. S.

La quantité d'électricité choisie pour unité pratique est le *coulomb*, soit aussi le dixième de l'unité de quantité C. G. S.

Enfin, pour honorer la mémoire de Faraday, on a réservé le nom barbare de *farad* (pourquoi pas faraday?), à la capacité prise pour unité ; c'est la mille millionième partie de l'unité théorique (1).

Le tableau ci-dessous résume toutes ces données.

*Unités électromagnétiques pratiques.*

| UNITÉS.                   | SYMBOLES | NOMS.        | VALEURS.             |
|---------------------------|----------|--------------|----------------------|
| Résistance. ....          | R        | Ohm.....     | $10^9$ unités C G S. |
| Force électromotrice..... | E        | Volt.....    | $10^8$ —             |
| Intensité.....            | I        | Ampère ..... | $10^{-1}$ —          |
| Quantité.....             | Q        | Coulomb..... | $10^{-1}$ —          |
| Capacité.....             | C        | Farad .....  | $10^{-9}$ —          |

Ces unités pratiques sont d'un usage très commode ; en effet, un ampère correspond au passage d'un coulomb par seconde dans le circuit. Un ampère-heure transporte donc 3.600 coulombs.

Une différence de potentiel d'un volt, entre les extrémités d'un fil conducteur ayant une résistance d'un ohm, produit un courant d'un ampère.

Enfin, un coulomb porte un farad à la tension d'un volt (2).

Il serait oiseux d'insister sur l'utilité de ces relations si simples.

Des multiples et sous-multiples ont été créés à l'aide des préfixes

(1) Voir note D.

(2) Voir note E.

*mega, micro, milli.* *Mega* désigne une unité un million de fois plus grande, *micro* une unité un million de fois plus petite et *milli* une unité mille fois plus petite ; c'est ainsi qu'il faut entendre les megohms, microhms, microfarads et milliampères.

Il restait à déterminer expérimentalement une des unités, à la représenter d'une façon matérielle et, pour les besoins de l'industrie et de la science, il fallait créer des étalons, afin de ramener toutes les mesures des grandeurs électriques à une simple comparaison entre des grandeurs de même espèce.

La résistance est évidemment la grandeur électrique qui se prête le mieux à une représentation matérielle ; elle remplit les conditions de permanence que doit avoir un étalon, ainsi que les conditions d'usage et de maniabilité. Je suis obligé de renoncer à décrire ici le procédé auquel on a eu recours pour trouver expérimentalement la valeur de l'ohm (1) ; mais voici le résultat auquel on a été conduit :

L'ohm légal est la résistance d'une colonne de mercure d'un millimètre carré de section et de 106 centimètres de longueur à la température de la glace fondante.

Cet étalon peut être reproduit facilement par des bobines de fil de maillechort (argent allemand), alliage qui présente des qualités remarquables de permanence, et on trouve aujourd'hui dans le commerce des boîtes d'unités, qui sont véritablement pratiques.

La pile de Daniell, montée au sulfate de zinc et au sulfate de cuivre, peut être considérée comme un étalon de force électromotrice, car la différence de potentiel entre ses bornes est à peu près égale à 1,08 volt (2).

Le coulomb n'a pas, à vrai dire, d'étalon, mais il est cependant bien nettement spécifié par ce fait, qu'un coulomb libère par seconde, dans un voltamètre, 0,0104 milligrammes d'hydrogène : plus sim-

---

(1) Voir note F.

(2) Voir note G.

plement 96 coulombs libèrent un milligramme d'hydrogène ou 4,4340 milligramme d'argent (3).

Le farad, bien qu'il soit la mille millionième partie de l'unité absolue, est encore colossal : le globe du soleil, avec ses 700,000 kilomètres de rayons, n'a qu'une capacité d'un décifarad ; il faudrait 4.400 globes terrestres pour réaliser un farad. Ne vous étonnez donc pas de ne voir reproduire que le millionième de farad, le microfarad. On vend des condensateurs d'un tiers de microfarad, formés de feuilles d'étain, séparées par une lame de mica recouverte de gomme laque. Une grande batterie de dix jarres, présentant un mètre carré d'armatures, formée d'un verre ayant un millimètre d'épaisseur, vaut environ  $\frac{1}{55}$  de microfarad.

A part l'unité de capacité, les unités méritent bien leur nom d'unités pratiques. Quelques exemples vous le démontreront.

Le milliampère est l'unité des télégraphistes : 15 milliampères suffisent pour actionner un récepteur Morse.

Les médecins ne dépassent pas, dans l'application des courants continus, 25 milliampères ; avec 50 milliampères, ils font de la galvanocaustique.

Un Daniell, fermé sur lui-même en court circuit, donne 0,53 ampère ; un Bunsen, 42 ampères environ : il s'agit ici d'éléments de 20 centimètres de hauteur.

Dans l'industrie, on emploie pour l'éclairage par incandescence des courants de 20 à 200 ampères, suivant le nombre des lampes, au taux moyen de 0,5 à 1,5 ampère par lampe.

Pour l'électro-métallurgie, on a construit des machines de 3.500 ampères : la société Gramme a créé ce type en vue de l'affinage du cuivre ; la tension entre les bornes de ce générateur ne dépasse pas 4 volts.

Quelques volts suffisent pour illuminer une petite lampe à incan-

---

(3) Voir note H.

descence de une à deux bougies ; les bijoux électriques , dont on se rappelle la vogue , n'exigeaient que 3 volts et demi et 2 ampères , et il suffisait de deux petits accumulateurs de poche, montés en tension, pour obtenir un rubis scintillant.

On construit des modèles de lampes extrêmement variés , aux différences de potentiel de 20 à 100 volts.

L'arc voltaïque des régulateurs demande au moins 45 volts et généralement on compte sur 50 ; l'intensité du courant peut varier entre 5 et 25 ampères.

La longueur de l'arc dépend du nombre de volts disponibles : 45 volts donnent à peine 1 millimètre , 4.000 volts font jaillir l'arc entre deux charbons écartés de 100 millimètres. L'énergie lumineuse croît avec l'intensité du courant.

Pour obtenir une étincelle entre deux plateaux métalliques , distants de 1 millimètre , plusieurs milliers de volts sont nécessaires. J'estime qu'il en faut 4,000. La grande bobine de Ruhmkorff , dont je vais vous montrer les brillantes étincelles, développe au moins 250.000 volts.

Passons aux résistances.

En fil de cuivre de 1 millimètre de diamètre, on peut compter sur un ohm par 48 mètres de longueur : avec le bronze siliceux, la résistance est plus grande et l'ohm correspond à une longueur de 30 mètres ; mais ce fil est plus tenace que celui de cuivre , et l'on peut espacer les supports de 400 à 500 mètres, ce qui est un grand avantage pour les lignes téléphoniques.

Le Ministère des Postes et Télégraphes emploie pour les lignes françaises du fil de fer de 5 millimètres de diamètre, de 4 ou de 3. Le fil de 4 a une résistance de 9 ohms par kilomètre.

La résistance intérieure des piles est un élément intéressant : appelons  $r$  cette résistance,  $E$  la force électro-motrice de la source et  $R$  la résistance du circuit extérieur ; on calculera sans peine l'intensité du courant par la formule  $I = \frac{E}{R+r}$ . En exprimant  $E$  en volts ,  $R$  et  $r$

en ohms, on trouve I en ampères. Or, voici quelle est la résistance intérieure des piles les plus répandues.

| PILE.                                       | RÉSISTANCE INTÉRIEURE. |
|---|------------------------|
| Daniell, de 20 centimètres de hauteur ..... | 1 à 1,50 Ohm.          |
| Bunsen, — — .....                           | 0,15 à 0,25            |
| Reynier, — — .....                          | 0,07 à 0,10            |
| Tommasi, — — .....                          | 0,20                   |
| Leclanche, — — .....                        | 5 à 6.                 |

Des progrès ont été réalisés relativement à la durée des piles : un élément Scrivanow peut débiter un ampère pendant une heure, soit 3.600 coulombs. Le grand élément de Lalande et Chaperon donne sans peine un million de coulombs. La pile Trouvé, à charbons plats de 15 centimètres de côté, fournit un courant de 24 ampères, en court circuit, pendant un quart d'heure, et elle débite 180,000 coulombs avant l'épuisement du liquide chromique.

Comment aurait-on pu exprimer toutes ces choses il y a dix ans, en si peu de mots et d'une façon si nette et si précise ! Grâce aux unités C.G.S., l'électricité se mesure avec une facilité extraordinaire, et les quelques exemples que j'ai produits ci-dessus en sont une preuve surabondante.

Les applications de l'électricité ont pris une si grande place dans la vie, que j'ai cru devoir aborder l'exposé de ces questions ; la facon de ceux qui font métier d'exploiter l'électricité sans la connaître aurait pu jeter le discrédit sur cette terminologie nouvelle (1), et j'ai voulu vous montrer que le système des unités électriques était un chef-d'œuvre de méthode et de simplicité. Vous avez maintenant la clef du langage et l'on ne vous en imposera plus en usant de mots inconnus.

---

(1) Voir note I.

Molière a rendu service aux médecins en riant de leurs travers ; le grand comédien aurait pu être aussi utile aux électriciens des dernières années. Terminons en nous égayant un peu au sujet de l'un d'eux, qui recevait, il y a quelques années (cela s'est passé au plus tôt en 1882), un envoi de lampes à incandescence. La note d'expédition mentionnait 50 lampes Swan de 20 bougies et 45 volts. On ouvre la caisse : les lampes y étaient bien soigneusement emballées, au nombre indiqué. C'est bien, se dit notre savant, je vois les lampes, mais les volts ? Et il télégraphie aussitôt au constructeur : « Reçu les lampes, manquent les 45 volts. »

Que de fois le Pirée a été pris pour un ami !

J'aime à espérer qu'aucun de mes auditeurs ne fera plus désormais de confusion entre les unités de force électromotrice, de résistance et d'intensité de courant : on devrait aujourd'hui pardonner plutôt à un homme de prendre Louis XII pour le fils de Louis XI, que d'ignorer ce qu'est un volt, un ohm et un ampère.

---

## TROISIÈME CONFÉRENCE.

---

### GÉNÉRATEURS ET TRANSFORMATEURS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

---

MESSIEURS ,

L'Électricité est un transmetteur d'énergie.

En effet, cet agent, qu'on appelle mystérieux par habitude, mais dont la fonction est évidente, ne peut être créé qu'au prix d'une certaine quantité d'énergie, qu'il emmagasine d'abord, pour ne la restituer qu'après l'avoir portée au point voulu, sous la forme voulue. L'énergie est donc le premier et le dernier terme de tout phénomène électrique; les kilogrammètres ou les ergs sont sa mesure. Le système des unités C. G. S. est basé sur ces considérations mécaniques. En prenant pour point de départ trois unités fondamentales, le centimètre, la masse-gramme et la seconde, on est conduit à définir des unités dérivées pratiques de résistance, l'*ohm*, de force électromotrice, le *volt*, d'intensité, l'*ampère*, de quantité, le *coulomb* et de capacité le *farad*. Toutes ces unités se rattachent à l'*ohm*, déterminé expérimentalement, comme le système métrique se rattache au mètre, la quarante-millionième partie du méridien terrestre. Ce peu de mots renferme l'idée dominante de nos deux premières conférences.

Il nous reste aujourd'hui, pour compléter notre étude, à formuler les lois qui régissent le transport de l'énergie à distance et ses diverses transformations.

Toute la science de l'électricité consiste dans quelques équations de transformation de l'énergie entre les appareils générateurs, dans lesquels on dépense du travail, et les appareils récepteurs qui restituent ce travail. Tout l'intérêt théorique des études spéculatives, tout l'intérêt industriel des essais d'applications, tout l'intérêt commercial des exploitations diverses de l'électricité réside dans ces formules. Nous consacrerons cet entretien à leur démonstration en même temps que nous montrerons le parti merveilleux qu'on peut en tirer. Le chapitre de la physique mécanique, que je vais avoir l'honneur de développer devant vous, est un des plus beaux que l'on puisse proposer à votre attention.

On appelle, dans le langage courant, *générateurs* d'électricité, les appareils qui débitent de l'électricité, tels que les piles et les machines magnétos ou dynamos : cette appellation est incorrecte. En effet, une pile n'engendre pas l'électricité, pas plus qu'une pompe à eau n'engendre de l'eau, pas plus qu'une machine de compression n'engendre de l'air, pas plus qu'une machine pneumatique n'engendre le vide, qui est une négation. Une pompe élève un poids d'eau  $Q$  à un niveau  $H$ , en dépensant un travail  $QH$  ; elle consomme du travail pour créer une différence de niveau, une différence de potentiel, si l'on veut ; il en est de même de la pompe de compression et de la machine pneumatique. Or, la pile et toutes les machines électriques n'ont pas d'autre fonction ; elles créent une différence de potentiel  $E$ , grâce à laquelle une certaine quantité d'électricité  $Q$  sera mise en mouvement, en produisant un courant ; en réalité, cette quantité  $Q$  est élevée à une différence de niveau  $E$ . Ce résultat ne peut être obtenu que par une dépense de travail. Voilà comment ces machines absorbent de l'énergie, que ce soit une énergie potentielle empruntée aux affinités chimiques comme dans la pile, ou que ce soit une énergie cinétique, de la force vive, comme dans les machines magnétos ou dynamos.

Le produit  $EQ$  mesure l'énergie électrique disponible ; grâce à nos unités dynamiques, ce produit, qui est l'expression d'un travail,



est évalué en ergs, si E et Q sont évalués en unités CGS. Si l'on énonce E en volts et Q en coulombs, le travail sera mesuré en 10 millions d'ergs, soit en 10 mégergs (1).

Mais ni l'erg, ni le mégerg ne sont encore entrés dans nos mœurs, et le kilogrammètre conserve toujours sa forte position, défendue par un long usage et par la valeur pratique qu'il représente. Transformons donc l'erg en kilogrammètres. Un calcul fort simple donné en note (2) nous conduit à cette règle, dont nous ferons maintes fois usage; on exprime en kilogrammètres un travail évalué en volt-coulombs en divisant les volt-coulombs par le nombre 9,81.

Jusqu'ici nous n'avons pas encore tenu compte du temps; or, la puissance des moteurs est déterminée par le travail qu'ils effectuent dans l'unité de temps; l'énergie électrique disponible devra être ramenée de même à la seconde. Notre système d'unités s'y prête bien, parce que le coulomb est la quantité débitée à la seconde par un courant d'un ampère; les volt-coulombs par seconde correspondent donc aux volt-ampères.

Comment passerons-nous des volt-ampères au cheval-vapeur, par lequel on mesure la puissance d'une machine motrice? Le cheval vaut 75 kilogrammètres par seconde; il est facile de voir qu'on transformera l'énergie électrique en chevaux en divisant les volt-ampères par  $9,81 \times 75$ , soit 736 (3). D'où cette nouvelle règle: on exprime en chevaux une puissance évaluée en volt-ampères, en divisant les volt-ampères par le nombre 736.

Nous avons franchi un cap dangereux pour l'attention de quelques-uns de mes auditeurs; mais nous allons être dédommagés de nos peines par la largeur des horizons qui s'ouvrent devant nous et la richesse des terres auxquelles nous allons aborder.

---

(1) Voir note J.

(2) Voir note K.

(3) Voir note L.



La considération des volt-ampères introduit, en effet, dans l'étude de l'électricité une simplification étonnante et une méthode admirable. C'est pour cela sans doute que Siemens a eu la malencontreuse idée de faire donner un nom spécial à ce produit. Aujourd'hui, on désigne généralement les volt-ampères par le mot de *watt*; je le regrette, car l'introduction de tant de noms illustres fera peut-être de l'électricité le panthéon de la science, mais ne facilitera pas la diffusion des doctrines nouvelles. Les mots de dyne-centimètre et de volt-ampère étaient bien plus significatifs que ceux d'erg et de watt; toutefois, conformons-nous à l'usage et acceptons les ergs et les watts, en rejetant par contre obstinément les joules, les gauss, les œrsted et les weber dont on nous menace (1).

Quoi qu'il en soit, l'emploi du volt-ampère ou du watt, donne au langage électrique une précision mathématique, due aux conceptions toutes mécaniques sur lesquelles il repose; une étude des piles nous en fournira la preuve.

Autrefois, je veux dire avant 1881, on définissait bourgeoisement les propriétés différentes des piles en disant qu'elles étaient faibles ou puissantes; les physiciens parlaient seuls de force-électromotrice, mais ils ne s'entendaient guère entre eux et ne se comprenaient pas toujours eux-mêmes.

Écoutez aujourd'hui la monographie d'une pile, celle de Daniell par exemple.

Cette pile a une force électromotrice de 1,07 volt; le modèle de

---

(1) Les plus illustres ont payé leur tribut à la passion du néologisme; Sir William Thomson a proposé, en 1883, d'appeler *mho* l'unité pratique de conductibilité; c'est l'anagramme de l'ohm, obtenu par renversement des lettres. La raison de ce choix est que la conductibilité est l'inverse de la résistance; Sir Thomson a fait observer que si, après avoir dit ohm devant un phonographe, on faisait tourner le cylindre à l'envers, on l'entendrait dire mho. Nous estimons dangereuse cette tendance à créer des appellations spéciales pour toutes les grandeurs qu'on peut considérer en électricité. L'école que nous combattons nous accusera de *misonéisme*: c'est encore un mot de son vocabulaire; soit, mais que Dieu nous garde des *philonéistes*, sinon c'en serait fait du langage scientifique.

20 centimètres, monté aux sulfates de cuivre et de zinc, présente une résistance intérieure de 2 ohms environ. En court circuit, le courant aura donc une intensité de  $\frac{1,07}{2} = 0,53$  ampères. L'énergie de cette pile peut, dès lors, être évaluée en volt-ampères ou watts ; elle est égale à 0,57 watt, soit à 0,06 kilogrammètre ; sa puissance est de 0,00077 cheval. Il faut donc environ 1300 éléments Daniell pour produire un travail d'un cheval ; ces éléments brûleront par heure 2250 grammes de zinc, réduiront 8500 grammes de sulfate de cuivre du commerce ( $\text{CaO}, \text{SO}^3 + 5 \text{HO}$ ) et déposeront au pôle positif 2125 grammes de cuivre pur ayant une valeur vénale. En estimant le zinc à 0,65 le kilo, le sulfate à 0,70 et le cuivre à 1,50, le prix du cheval-heure pratique ressort à 4 fr. 20 environ. Le prix du cheval théorique eût été de 1 fr. 70 (2).

Même à ce prix, les piles de Daniell seraient des sources d'énergie trop coûteuses.

On cherche depuis longtemps une pile puissante et économique : le premier résultat est atteint, mais non le second. Ainsi, la pile de Bunsen de 20 centimètres de hauteur donne 0,384 kilogrammètre par seconde, mais le cheval-heure coûte 6 francs ; la pile Reynier de trois litres fournit 0,765 kilogrammètre, au même prix de revient environ. Certaines piles chromiques atteignent jusqu'à 15 watts, soit un kilogrammètre et demi par seconde ; c'est avec ces piles qu'on essaya, il y a quelques années, l'éclairage du Comptoir d'Escompte et du Bon-Marché, mais il fallut y renoncer bientôt à cause des frais énormes d'entretien des éléments.

Dans l'état actuel de l'électricité, l'emploi des générateurs électro-chimiques est ruineux ; on ne peut y recourir que dans certains cas spéciaux, alors que des amateurs entreprennent des éclairages de luxe ; le plaisir qu'ils trouvent à leur installation leur fait oublier que les dépenses sont hors de proportion avec les résultats obtenus.

---

(2) Voir note M.

Et cependant les piles rendraient, en bien des circonstances, des services signalés. L'inventeur qui découvrirait une pile puissante, économique, constante, de grande capacité (1), sans odeur, facile à installer, à conduire et à entretenir, ferait réaliser de sérieux progrès à l'électricité, et il arriverait rapidement à la fortune et à la renommée, double séduction à laquelle les savants eux-mêmes ne sont pas insensibles.

Cette importante découverte est à faire, mais on a le droit d'y compter pour l'avenir, car la pile donne un rendement excellent; ainsi, un élément de Daniell a une force électromotrice théorique de 1,11 volt, supérieure de 0,04 volt seulement à la force électromotrice réelle; pour la pile de Bunsen, le calcul mène à 2 volts et l'expérience donne 1,8 (2).

On avait fondé les plus grandes espérances sur les piles thermo-électriques de M. Chaudron: une pile de 50 éléments a une énergie de 5 watts; le cheval-heure coûte 30 mètres cubes de gaz, ce qui, au prix de 22 centimes, correspond à une dépense de 6 fr. 60. C'est peu pour une pile aussi maniable et aussi simple, mais c'est trop pour l'industrie, si l'on compare ce prix à celui de l'électricité débitée par les machines magnétos ou dynamos auxquelles nous amène le développement rationnel de notre programme.

Dans les piles, on utilisait de l'énergie potentielle due aux affinités chimiques des corps hétérogènes en présence; dans les machines, on dépense de l'énergie actuelle, du travail. Je vous ai expliqué dans notre premier entretien le mécanisme de ces générateurs; en déplaçant une bobine, appelée l'*induit*, dans un champ magnétique, on fait naître une différence de potentiel entre les deux extrémités du fil

---

(1) La capacité d'une pile dépend du nombre de coulombs qu'elle peut débiter sans renouvellement des liquides excitateur et dépolarisant; ainsi la pile de Lalande a une capacité énorme, car le plus petit modèle débite 40,000 coulombs et le grand, un million.

(2) Voir note N.

de cette bobine. Ce déplacement relatif est produit par un moteur mécanique ; l'énergie électrique développée est équivalente au travail dépensé dans ce mouvement, sauf les pertes inséparables de toute transformation d'énergie. Le *rendement* industriel du générateur est égal au quotient de l'énergie électrique utilisable entre les bornes, par l'énergie cinétique absorbée.

Expliquons ce premier point par un exemple.

Prenons un type courant de machine de Gramme ; donnons-lui une vitesse de 1750 tours par minute et faisons-la travailler sur une résistance extérieure de 7,16 ohms, alors que sa résistance intérieure (de l'induit et de l'inducteur entourant les électros), est de 1,136 ohms à chaud. A l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre, nous constatons que la différence de potentiel aux bornes du générateur est de 129 volts, tandis que l'intensité du courant produit est de 18 ampères. Quelle est l'énergie disponible ? Elle est de  $129.18 = 2322$  watts, soit de 237 kilogrammètres ou de 3,16 chevaux. Or, il a fallu dépenser 298 kilogrammètres pour entretenir cette vitesse de rotation de 1750 tours ; le rendement est donc de  $\frac{237}{298} = 78$  pour cent. C'est ce qu'on appelle le *rendement électrique disponible*, le seul dont nous nous occuperons (1).

On a construit des machines Gramme dont le rendement mécanique était plus considérable ; mais les résultats que nous citons ont été obtenus en travail courant et nous pouvons nous y tenir.

Deux conséquences ressortent de cette application.

Nous pouvons d'abord calculer le prix de revient du cheval-heure d'énergie électrique disponible. Ce prix dépend de ce que coûte le cheval-heure d'énergie mécanique du moteur. Si cette énergie est empruntée à une puissante machine à vapeur, comme c'est le cas habituel de l'industrie, on peut estimer le prix de revient du cheval-heure à 10 centimes, ce qui met le cheval-heure d'énergie électrique

---

(1) Voir note O.

à 13 centimes au plus. Nous voilà fort loin des prix de revient constatés avec les piles et vous pouvez apprécier quels progrès ont été faits depuis que Gramme a rendu pratiques et industrielles les machines d'induction. Ce résultat s'explique aisément. Dans les piles on brûle du zinc qui coûte 0 fr. 65 le kilogramme ; dans le foyer d'une chaudière à vapeur, on brûle du charbon à 2 centimes le kilogramme.

Comparons la pile à gaz Chaudron avec une dynamo, actionnée par un moteur à gaz de 4 chevaux ; le combustible est le même dans les deux appareils. Le cheval-heure produit par un bon moteur à gaz coûte 0 fr. 31 (1) et le cheval-heure d'énergie électrique monte à peine à 0 fr. 40, alors qu'il coûtait 6 fr. 60 par la pile Chaudron.

La seconde application que nous pouvons faire de ces considérations est encore très pratique. Les unités CGS nous permettent de résoudre le problème suivant : il vous faut, je suppose, 100 volts et 50 ampères et vous vous demandez quelle puissance de moteur est nécessaire pour produire ce débit d'électricité dans ces conditions. Un calcul élémentaire vous donnera la solution cherchée ; 100 volts et 50 ampères font 5000 watts, soit  $\frac{5000}{736} = 7$  chevaux environ ; en réalité, il en faudra 9, en tenant compte du rendement disponible du générateur d'électricité ; ce dernier chiffre devra lui-même être majoré pour tenir compte de ce que coûte le transport de l'énergie électrique, car rien n'est gratuit dans la nature. L'échauffement inévitable des conducteurs est le prix de ce transport. On ne peut l'estimer *a priori* (2) si l'on ne connaît la résistance du circuit et l'intensité du courant.

Vous le voyez, Messieurs, les questions qui embarrassaient les

---

(1) Ce chiffre a été établi dans le *Traité des moteurs à gaz* de l'auteur de cette conférence, pages 275 et 278.

(2) Il s'agit ici de chevaux effectifs, disponibles sur l'arbre de couche du générateur, sans transmissions.

mattres il y a quelques années sont, aujourd'hui, mises à la portée des enfants.

La solution que je viens de vous donner est bien plus pratique qu'elle ne le paraît d'abord. Un industriel désire éclairer ses ateliers par 50 lampes à incandescence de 16 bougies, exigeant par lampe 100 volts et un peu moins d'un ampère; il lui faudra 9 chevaux pour le moins. On veut installer dans une vaste salle un puissant foyer de lumière, de 500 carcels, à l'aide d'un régulateur à arc demandant 50 volts et 30 ampères; on devra disposer de  $\frac{1500}{736} = 2,2$  chevaux d'énergie électrique et d'au moins 2,5 chevaux d'énergie mécanique. Enfin, un nickelleur se propose de déposer 200 grammes de nickel par heure; un générateur de 3 volts au plus, et de 200 ampères y suffira, et il faudra pour le mouvoir un peu plus d'un cheval de puissance mécanique.

En un mot, tout se calcule, rien n'est livré au hasard, l'empirisme est condamné; la science de l'ingénieur compétent est nécessaire pour établir une installation, mais tout homme sensé peut devenir ingénieur à son heure, tellement sont simples et lumineuses les théories qui donnent la clef de tous ces phénomènes. Admirez les travailleurs dont le labeur patient et infatigable a élevé cet édifice merveilleux, fondé sur les unités CGS et applaudissons-les d'avoir su créer une œuvre qui donne si complète satisfaction aux savants en même temps qu'elle aide si puissamment ceux qui cherchent à étendre les applications, j'allais dire le règne de l'électricité.

---

La distribution de l'énergie à domicile est le rêve caressé par les électriciens : c'est un objectif séduisant et bien digne d'exciter l'ambition des inventeurs de génie. Quelle révolution, en effet, au point de vue industriel, économique et social, si l'électricité, canalisée comme l'eau et le gaz, mettait à notre disposition, dans nos demeures, toutes les formes de l'énergie qu'elle peut transmettre, lumière,

chaleur, effets chimiques et travail mécanique ! Plus d'appareils d'éclairage à surveiller, à entretenir et à allumer ; plus de foyers dans les appartements, partant plus de charbon, la chaleur étant rayonnée par des corps réfractaires incandescents ; plus de machines à mouvoir ; de simples commutateurs à tourner pour qu'aussitôt la lumière jaillisse, la chaleur se répand et les mécanismes les plus divers se mettent en marche à volonté, à tout instant, durant tout le temps qu'on voudra. Tout le combustible, dépensé aujourd'hui dans les mille fourneaux de la cité, serait brûlé dans un appareil unique, pour animer de puissants moteurs actionnant eux-mêmes les générateurs d'électricité, qui déverseront des milliards de coulombs dans les artères d'une circulation immense et distribueront l'énergie partout, comme elle se distribue dans nos organes. N'est-ce pas un conte des mille et une nuits que nous venons de reproduire, en faisant de l'électricité la fée bienfaisante dont la baguette enchantée opérait tant de merveilles ? On se demande ce que deviendra l'énergie morale de nos descendants alors que, servis avec tant de ponctualité par cet agent docile, ils n'auront plus rien à faire qu'à penser !

Eh bien, la distribution de l'énergie n'est pas un rêve, mais c'est une conquête prochaine de la science, dont nous pouvons escompter les résultats ; le problème a été posé il y a dix ans, et les premières ébauches de solution ont été si heureuses, qu'on a passé aussitôt de la conception à l'application. A l'Exposition de 1881, Edison actionnait des appareils télégraphiques, des pompes, des presses, des perforateurs et un éventail domestique, dans deux salles, éclairées par des milliers de lampes et chauffées par une source intense de chaleur ; rien n'avait été oublié, pas même l'allumeur de cigares que le visiteur trouvait à l'entrée. Aujourd'hui, un restaurateur de Paris, Marguerie, moule le café, broie la bisque, tamise les farines, lave les assiettes, cire les parquets, rince les bouteilles et transvase les vins en utilisant l'énergie distribuée par l'électricité dans son vaste établissement. A la Trappe de Bonneval, dans l'Aveyron, la cloche du



monastère est mise en branle par l'électricité, et, de sa stalle, une religieuse trappistine gouverne, par un commutateur, les tintements de l'*Angelus*; pour le lever de nuit, la prieure n'a encore qu'à tourner un commutateur pour réveiller ses pieuses compagnes et éclairer les dortoirs, les cloîtres et la chapelle; un ruisseau, la Boralde, a été mis à contribution pour actionner les générateurs d'électricité et il suffit à tout ce travail. Nous pourrions multiplier ces curieux exemples.

Nous préférons étudier la question à un point de vue plus général.

Comment doit-on comprendre une distribution d'électricité?

Imaginons une usine centrale de production d'énergie électrique: des sources puissantes alimentent un réseau, sur lequel sont branchés les récepteurs de tout genre, susceptibles d'utiliser l'énergie d'un courant. Ce seront des lampes à incandescence et des régulateurs à arc, des allumeurs variés, des foyers domestiques et industriels, depuis le plus modeste fourneau jusqu'aux creusets dans lesquels coule le platine fondu et les chalumeaux à soudure autogène; dans un autre ordre d'applications, nous y trouverons des appareils à électrolyse, bains de galvanoplastie, de nickelage, de blanchiment, rectificateurs d'alcool, etc.; puis enfin, il faudra mouvoir d'innombrables machines, des sonneries, des imprimeurs télégraphiques, des outils à travailler le bois et les métaux, des machines à coudre, etc., etc. Tous ces appareils, de nature si diverse et de puissance si différente, devront être mis en activité à un moment quelconque du jour ou de la nuit, sans influencer en aucune façon sur le fonctionnement de tous les autres. Voilà le cahier des charges d'une entreprise de distribution d'électricité.

Deux difficultés parurent d'abord s'opposer à la réalisation de ce programme: la première provenait de ce que la quantité totale d'énergie à produire dans l'usine centrale devait varier constamment, par suite de l'arrêt partiel d'une grande partie des appareils; la seconde, de ce que le même régime de courant ne convient pas à des outils

aussi divers, un arc voltaïque exigeant par exemple 50 volts, alors qu'une cuve à décomposition chimique n'en demande que deux ou trois.

Ces deux obstacles ont été surmontés.

L'hydraulique a fourni par analogie la solution du premier problème. Soit une batterie de turbines, actionnées par une chute d'eau de hauteur constante, mais dont on pourrait faire varier le débit; il serait facile de proportionner, à tout moment, le travail des turbines au travail utile demandé, en ne débitant qu'une partie déterminée de l'eau disponible: c'est un procédé dont l'usage a démontré le caractère pratique. Nous ferons de même en électricité: tous les appareils seront placés sur des conduites distinctes aboutissant aux deux pôles du générateur, c'est-à-dire qu'ils seront disposés en dérivation; de plus, nous maintiendrons entre les pôles une différence de potentiel constante. De cette façon, les appareils récepteurs, placés l'un à côté de l'autre, utiliseront toute la hauteur de chute, mais ils se partageront les coulombs débités par la source. En d'autres termes, la distribution se fera à volts constants et à ampères variables, ces derniers étant proportionnés à la demande d'énergie dans le circuit. Ce dernier effet ne pourra être obtenu généralement que par l'emploi d'un régulateur spécial, modérant l'intensité du courant inducteur des électros par l'introduction de résistances variables: c'est le système adopté par Edison. Un ouvrier, l'œil fixé sur un voltmètre, modifie les résistances suivant les besoins, de manière à conserver une même différence de potentiel, ou bien un appareil automatique remplit cet office, ce qui s'obtient sans peine. Mais on peut demander au générateur de régler par lui-même l'intensité du courant et de maintenir constante sa force électromotrice: ceci est réalisable par les machines dynamos *compound* auto-excitatrices ou à excitation séparée (1); dans ce cas encore l'énergie disponible est toujours

---

(1) Voir note P.

égale à la dépense dans la distribution. C'est la solution de M. Marcel Deprez.

Faisons observer que les circuits dérivés peuvent renfermer un ou plusieurs appareils disposés en série, à la suite les uns des autres, de manière à réduire la chute de potentiel entre les bornes de chacun d'eux : par ce procédé, on résout en partie la seconde difficulté que nous avons signalée. Mais ce n'est qu'une solution imparfaite, car elle n'est pas toujours acceptable (1).

Cherchons donc un moyen d'accommoder la tension et l'intensité du courant aux exigences de chaque récepteur. En général, les distributions se feront avec des forces électromotrices de 5 à 6000 volts et des intensités de quelques ampères : 6000 volts et 10 ampères donnent 60,000 watts, soit plus de 80 chevaux de force. Cette combinaison des hautes tensions avec les faibles intensités est avantageuse, car l'énergie transformée en calorique dans un circuit, c'est-à-dire, l'énergie perdue (2) est proportionnelle au carré de l'intensité. Or, comment utiliser des courants aussi faibles et des tensions aussi élevées ?

La question semblait désespérée.

Les transformateurs ont sauvé la situation.

Qu'appelle-t-on un transformateur ?

Le mot est nouveau : la chose est ancienne.

Une bobine de Ruhmkorff étant traversée par un courant de quelques volts donne, par induction, une tension de plusieurs milliers de volts : cette bobine est un transformateur.

Les accumulateurs de M. Planté, et tous ceux qui ont été faits depuis lors sur ce type, étant assemblés en batterie (en surface) et chargés de la sorte par un courant de deux ou trois volts, peuvent être déchargés en série et ils donnent autant de fois deux volts qu'il y a d'éléments. Les accumulateurs sont des transformateurs.

---

(1) Voir note Q.

(2) C'est le prix du transport, nous l'avons fait remarquer maintes fois :  $W = I^2 R t$ .

La machine de Gramme peut elle-même servir à transformer l'électricité et à changer sa tension : concevez, en effet, que l'induit soit formé d'une double bobine, l'une à gros fil, l'autre à fil fin, et qu'on lance dans la première un courant de quatre à cinq volts; l'anneau se mettra en mouvement, mais il se produira conséquemment dans le fil long et fin de la seconde bobine, un courant continu de tension beaucoup plus considérable. Je viens de vous décrire le *robinet électrique* de M. Cabanellas ; c'est encore un transformateur, mais il est assez coûteux, et sera peu employé, car MM. Gaulard et Gibbs, puis MM. Zipernowski, Deri et Biaty ont réalisé des instruments d'induction dont le fonctionnement est parfait et le rendement supérieur. Ces appareils, presque identiques, peuvent être décrits ensemble.

Les nouveaux transformateurs (1) dérivent de la bobine de Ruhmkorff, à laquelle on a donné une forme industrielle : on y retrouve une bobine inductrice et une bobine induite. Toutefois, pour diminuer le volume de l'appareil et augmenter sa puissance et son rendement, les spires de l'inducteur alternent dans une même hélice avec les spires de l'induit ; cet agencement, inacceptable dans la bobine de Ruhmkorff, a donné d'excellents résultats dans les nouveaux appareils d'induction où les différences de potentiel sont beaucoup moindres. Au lieu de fils, MM. Gaulard et Gibbs emploient des lames plates de forme annulaire qui se superposent et s'empilent en colonne ; des rondelles de carton laqué les isolent les unes des autres. Au centre de la colonne, est placé un noyau de fils de fer doux qu'on peut abaisser ou soulever à volonté ; plus il est enfoncé, plus sont intenses les phénomènes d'induction. On peut donc régler de la sorte la quantité d'énergie disponible dans l'hélice secondaire, et faire varier la puissance de l'appareil.

---

(1) MM. Gaulard et Gibbs ont appelé leur appareil un *générateur secondaire*, de même qu'on appelait autrefois la pile de Planté une *pile secondaire* ; le nom de transformateur convient mieux dans l'espèce.

L'induit est divisé en quatre ou six sections, que l'on peut réunir en série ou assembler en dérivation à volonté : ces modifications d'agencement augmentent l'élasticité du fonctionnement des transformateurs et permettent de disposer de l'intensité du courant secondaire en fonction de celle du courant primaire.

Le courant primaire est nécessairement alternatif ; le courant secondaire le sera donc aussi.

Chaque appareil est composé d'un certain nombre de colonnes, (on peut dépasser 20), ayant 1<sup>m</sup>25 de hauteur environ, maintenues entre des plateaux de bois : des commutateurs spéciaux permettent d'introduire ces colonnes dans le circuit primaire en série ou en dérivation. La disposition relative de l'induit et de l'inducteur peut donc être modifiée à volonté et se prêter à toutes les modifications du courant que l'on a en vue, car la tension et l'intensité des courants secondaires varie suivant les dimensions relatives des deux circuits : l'objectif en vue est toujours de diminuer la tension et d'augmenter la quantité, en d'autres termes de réduire les volts et de faire croître les ampères.

Les appareils Zipernowski, Deri et Blaty présentent quelques dispositions particulières : les inventeurs, imitateurs intelligents et ingénieux de Gaulard et Gibbs (1), ont amélioré la construction par des innovations de détail. Ils ont été conduits à des formes diverses de bobines, voire même à des formes annulaires, assez semblables à celles d'un anneau de Gramme qu'on aurait séparé des collecteurs. Il n'y a pas lieu d'insister sur ces perfectionnements, dont les amis de M. Zipernowski exagèrent peut-être l'importance et l'originalité, mais dont les heureux résultats sont indiscutables.

Le fonctionnement de ces divers transformateurs est régulier. Une seule condition est à remplir : Il faut qu'une différence de potentiel constante soit maintenue entre les bornes du circuit inducteur, bran-

---

(1) MM. Gaulard et Gibbs avaient eux-mêmes emprunté beaucoup à Jablochhoff, Harrisson, Bright, Normandy, etc., dont les antériorités sont indiscutables.

ché en dérivation sur la canalisation principale ; c'est l'hypothèse même de notre distribution et nous avons fait voir qu'elle était facilement réalisable. Dès lors, l'inducteur et l'induit ayant une très faible résistance, le rapport des différences de potentiel entre les bornes reste invariable ; il en résulte en définitive que la distribution par l'induit se fait elle-même à volts constants, l'intensité seule variant, pour atteindre la puissance voulue.

Les transformateurs présentent un grand intérêt pratique, attendu qu'ils ont un rendement de 90 à 95 pour cent ; ce chiffre a été constaté à plusieurs reprises par des hommes compétents, notamment par M. Ferraris, de l'Université de Turin. Ainsi, un courant primaire de 100 volts et de 10 ampères donne un courant transformé de 50 volts et de 19 ampères, soit 950 watts disponibles contre 1000 dépensés.

La théorie trouve, elle aussi, un curieux champ d'étude dans ces ingénieux appareils d'induction : voici en particulier un fait nouveau dont l'explication a dû être donnée. Lorsqu'on fait croître d'une manière continue la résistance extérieure du circuit secondaire, le courant induit diminue évidemment, mais le courant primaire diminue en même temps ; ce phénomène anormal est une conséquence de l'induction réciproque des circuits et de leur auto-induction (1). Ces variations du courant primaire ont été utilisées pour la régulation des machines génératrices des stations centrales.

Quelques expériences choisies me permettront de vous faire constater les résultats dont je viens de tracer un trop rapide exposé. Prenons une pile P de six ou huit éléments Bunsen ou Poggendorff, et lançons le courant dans l'appareil classique par lequel on étudie l'induction et dans une forte bobine de Ruhmkorff, ces deux appareils étant intercalés à la suite l'un de l'autre dans le circuit. La bobine produira l'interruption du courant. Plaçons une lampe sur le circuit

---

(1) On dit, aujourd'hui, self-induction ; auto-induction était sans doute trop français et trop intelligible.

induit de l'appareil classique, elle s'illuminera aussitôt, bien qu'elle exige 25 volts de tension, parce que l'induction a transformé le courant et augmenté ses volts. Or, nous verrons l'éclat de la lumière augmenter ou diminuer avec la distance explosive de l'excitateur placé dans l'induit de la bobine, ce qui démontre l'influence des variations de résistance du circuit secondaire, sur le courant primaire ; nous pourrons encore faire varier cet éclat en retirant plus ou moins le noyau du fil de fer de l'appareil classique.

Voici une deuxième expérience plus complète et plus probante. Gardons le dispositif précédent, mais recevons le courant induit de la bobine de Ruhmkorff dans l'induit d'une autre bobine semblable, dont nous calerons le trembleur ; en même temps nous placerons une nouvelle lampe entre les bornes du gros fil de cette seconde bobine. Nous allons assister à une transformation inverse de l'énergie. En effet, les deux lampes vont devenir incandescentes : le courant induit de la première bobine est retransformé par induction dans la seconde. Chose étrange : le maximum d'éclat de la première lampe, obtenu par la superexcitation magnétique du noyau de fer de l'appareil classique, correspond au minimum d'éclat de la seconde lampe. Ces belles expériences de cours, signalées à notre attention par l'*Electricien*, permettent de juger des effets remarquables des transformateurs et des ressources inespérées qu'elles mettent à la disposition des praticiens pour la distribution de l'électricité.

Les transformateurs fonctionnent à Londres, sur le Métropolitain, à Milan et à Turin, et partout ils donnent pleine satisfaction.

A Tours, l'usine centrale produit un courant de 850 volts et de 66 ampères ; quatre groupes de transformateurs Gaulard, montés en dérivation, reçoivent chacun 16 ampères sous la tension totale de 850 volts. L'énergie disponible est donc de  $850 \cdot 16 = 13.600$  watts = 18,4 chevaux. Or, chaque groupe fournit un courant secondaire de 50 volts et de 250 ampères, dont l'énergie est de 12,500 watts, ou de 16,9 chevaux : le rendement est donc de 92 pour cent. Ces courants de faible tension relative et de grande quantité, sont distribués

dans un rayon déterminé par les quatre groupes de transformateurs, et ils alimentent les lampes et les régulateurs les plus divers. L'usine maintient un potentiel constant, l'intensité est réglée par un appareil automatique et il s'établit un équilibre satisfaisant entre la dépense à l'usine et la consommation des particuliers.

Le problème de la distribution de l'électricité a donc reçu une première solution acceptable. Malheureusement, les courants alternatifs se prêtent mal à la distribution du travail, parce qu'ils exigent l'emploi de redresseurs de courant, ce qui entraîne une installation coûteuse et compliquée et donne des résultats économiques moins favorables.

La question en est là.

On a fait beaucoup déjà, il reste plus encore à faire, mais la science ne se décourage jamais ; elle poursuit toujours son chemin, elle avance à pas comptés et elle arrive. Le siècle ne s'achèvera pas sans que soit réalisé dans son entier le programme de la distribution de l'électricité et de l'utilisation des forces naturelles qui en est la conséquence immédiate. Nos fleuves créent des milliards de kilogrammètres d'énergie par jour en descendant de nos montagnes vers les côtes de la mer. Ces trésors d'énergie nous échappent ; ils sont à nous cependant et nous avons le devoir de les utiliser pour le plus grand bien de tous. Pour cela, il faut transporter cette énergie des points où elle devient disponible aux lieux où elle est utilisable ; cette tâche sera remplie par l'électricité.

L'eau, l'air comprimé et les câbles télodynamiques sont des transmetteurs avantageux aux distances de 100 à 1000 mètres ; au-delà, l'électricité est un intermédiaire plus économique, plus souple, moins encombrant, car il lui suffit d'un fil pour porter aux plus grandes distances une énergie considérable, par les chemins les plus accidentés et les plus sinueux (1). M. Marcel Deprez en a fait la démonstra-

---

(1) Voir note R.



tion : tout le monde connaît ses remarquables expériences. En 1882, il transportait un quart de cheval de Munich à Miesbach, à 50 kilomètres de distance, par un fil télégraphique, avec un rendement de 25 pour cent; en 1883, à Grenoble et à Paris, il transmettait cinq chevaux par un fil en boucle, et le rendement s'élevait à 48 pour cent, pour un parcours de 17 kilomètres; enfin, dernièrement, avec le concours obligeant des ingénieurs de la Compagnie du Nord et l'appui des plus puissants financiers de l'Europe, il actionnait de Paris à Creil, à 56 kilomètres de distance, des machines qui absorbaient 40 chevaux effectifs; dans cette dernière expérience, le conducteur était un fil de cuivre de 5 millimètres de diamètre et le rendement atteignait 50 pour cent. Le progrès est sensible: des essais plus complets se préparent et ils nous feront constater de nouveaux perfectionnements. Il ne s'agit pas encore d'utiliser les 17 millions de chevaux du Niagara pour alimenter d'énergie New-York ou Washington, mais on peut déjà songer à transmettre de grandes puissances à dix ou vingt kilomètres (1). M. Deprez a mis la question à l'ordre du jour et l'attention des industriels s'est portée sur ce point: c'est un grand résultat. Bientôt on éclairera nos cités et l'on y distribuera l'électricité en utilisant la force motrice des fleuves sur lesquels nos pères les ont bâties.

Quel avenir nous réservent ces brillantes conquêtes de l'électricité?

Je renonce à vous le dépeindre, car je ne suis ni prophète, ni poète, et il faudrait être l'un et l'autre.

Je serai mieux dans mon rôle en appelant votre attention sur la pensée qui se dégage de tout ceci.

Après qu'on eût jeté un câble par dessus les abîmes de l'Océan pour relier le vieux monde au nouveau, on invita le Président de la grande République Américaine à inaugurer ce nouvel instrument de

---

(1) La Compagnie d'éclairage de Buffalo vient de traiter avec la Compagnie du tunnel latéral du Niagara, pour l'utilisation de 10,000 chevaux au prix de 650,000 francs: la distance est de 32 kilomètres.

civilisation, mis par la Providence au service de notre siècle, comblé déjà de tant de bienfaits. Or, voici le télégramme qu'il adressa à la reine d'Angleterre : « Gloire à Dieu dans le ciel et paix sur la terre aux hommes de bonne volonté. » Ces mots, empruntés à l'Évangile, renfermaient une philosophie profonde : ils exprimaient un hommage et une prière. Je n'ai pas à commenter l'hommage rendu au Maître de toutes choses, à Celui qui venait de permettre aux savants de tourner une page de ce grand livre de la Nature, resté si longtemps fermé. Mais permettez-moi de développer la prière qui Lui était adressée : que toutes ces admirables découvertes du génie humain servent à l'amélioration des hommes, au développement de la civilisation, au maintien de la concorde et de la paix, à l'augmentation du bien-être de tous ; qu'elles contribuent à réduire de plus en plus le nombre de ceux qui souffrent et qui sont accablés sous le poids de la vie.

Puissions-nous dépenser nos forces et prodiguer nos efforts pour atteindre bientôt ce noble résultat ; ce sera l'honneur de la science et son titre le plus sérieux à l'admiration et à la reconnaissance de tous.

---

❖❖ NOTES ❖❖

NOTE A.

**Du potentiel électrique.**

Ce mot de *potentiel*, très usité aujourd'hui, doit être expliqué mais nous avons été obligé de rejeter en note ces considérations trop abstraites.

Un corps électrisé fait sentir son action dans l'espace qui l'entoure; il crée autour de lui un *champ électrique*. Ce champ est illimité; mais on n'a à considérer que les régions peu éloignées du système que l'on envisage.

Supposons qu'une masse d'électricité positive égale à l'unité soit placée dans un champ électrique; elle subira une action de grandeur et de direction déterminée, qui mesure l'*intensité du champ*.

Tout déplacement de cette masse d'électricité dans le champ exige un certain travail. Ainsi, il faut dépenser un travail pour amener, de l'infini en un point du champ, cette masse d'électricité prise pour unité, pour lutter contre les actions qu'elle subira le long du chemin parcouru. Ce travail définit le *niveau électrique* du point, c'est-à-dire son potentiel, de même que le travail nécessaire pour élever un kilogramme à une certaine hauteur définit le niveau auquel il a été amené.

En général, le travail nécessaire pour déplacer une masse positive, égale à l'unité, d'un point A en un point B, est égal à l'excès du potentiel en B sur le potentiel en A. Appelons  $V_B$  et  $V_A$  ces deux potentiels et  $W_A^B$  le travail dépensé: nous pourrions écrire:

$$W_A^B = V^B - V^A.$$

La fonction  $V$  est une fonction des coordonnées du point dans le champ : elle est définie par une intégrale.

Voilà dès lors la seule définition exacte du potentiel en un point : c'est le travail nécessaire pour amener depuis l'infini jusqu'en ce point une masse d'électricité égale à l'unité.

On peut considérer l'ensemble des points pour lesquels le potentiel a une même valeur : ces points sont situés sur une même surface, qu'on appelle la surface *équipotentielle*.

Les surfaces équipotentielles sont analogues aux surfaces de niveau de la topographie. Cette comparaison est utile pour faire comprendre les phénomènes qui se passent dans le champ électrique. En effet, les lignes normales aux surfaces de niveau sont appelées *lignes de plus grande pente* en topographie ; un corps pesant, abandonné à lui-même, tend à tomber en suivant une ligne de plus grande pente. De même, en électricité, on appelle *lignes de force*, la trajectoire orthogonale de toutes les surfaces équipotentielles ; une masse positive d'électricité abandonnée à elle-même tendra à passer du potentiel le plus élevé au potentiel le plus faible le long d'une ligne de force. Pour lui faire remonter les lignes de force, il y a un travail à dépenser.

Soit une masse  $M$  allant du potentiel  $V_2$  au potentiel  $V_1$  ; le travail à dépenser est  $M (V_1 - V_2)$ . Le travail électrique se présente donc, comme celui de la pesanteur, sous la forme d'un produit de deux facteurs, l'un  $M$ , qui correspond au poids du corps, l'autre,  $(V_1 - V_2)$  qui représente la différence de niveau. Si la masse descend, elle développe un travail, tandis qu'il faut lui en appliquer un pour la faire remonter.

Dans le premier cas, la différence de potentiel peut être considérée comme la cause qui produit le mouvement des masses électriques ; voilà pourquoi nous avons dit qu'une différence de potentiel est une *force électromotrice*.

NOTE B.

**De l'Énergie électrique.**

Pour produire un phénomène physique, il faut dépenser un certain travail ; or, supposons que les corps sur lesquels l'opération s'est effectuée retournent à leur état primitif, ils reproduiront le même travail, mais en sens contraire. La première dépense de travail n'avait donc pas été perdue, attendu qu'elle avait constitué les corps dans une situation telle, qu'ils étaient capables de développer en retour une somme déterminée de travail. Ils possédaient ce travail en puissance. On dit qu'ils avaient une *énergie de position*, puisqu'elle dépend de la position à laquelle les avait élevés le premier travail.

Ce mot d'*énergie*, proposé par Rankine, n'a pas d'autre sens : il est d'un emploi très commode. En élevant un poids  $P$  à une hauteur  $H$ , je lui donne une énergie de position égale à  $PH$ , attendu qu'il a la puissance de fournir, en retombant à son niveau primitif, un travail  $PH$  : cette énergie de position s'exprime en kilogrammètres. Je remonte ma montre : je dépense un travail qui s'emmagasine dans le ressort sous la forme d'énergie de position.

L'énergie peut affecter les formes les plus diverses. Chargeons un condensateur au moyen d'une machine de Holtz : nous y avons emmagasiné, avec l'électricité, de l'énergie. De même encore, on emmagasine des vibrations lumineuses en insolant un corps phosphorescent ; enfin, en chauffant l'eau renfermée dans une chaudière pour la vaporiser, on emmagasine de la chaleur et par suite du travail en puissance. Nous venons de donner des exemples qui font comprendre ce qu'est l'énergie électrique, l'énergie lumineuse et l'énergie calorifique.

Nous distinguons toutes ces formes de l'énergie par le témoignage de nos sens, ou bien par l'emploi d'instruments délicats, qui élargissent notre domaine.

Les affinités chimiques constituent aussi une forme d'énergie : cette

énergie se mesure par les chaleurs de combinaison, et c'est le fondement de la thermochimie ou mécanique chimique. L'énergie chimique se chiffre par des nombres extrêmement élevés : l'énergie d'un kilogramme de charbon est de trois millions et demi de kilogrammètres.

L'énergie étant indestructible, il faut nécessairement qu'on la retrouve intégralement quand elle change de forme, sous une forme ou sous plusieurs autres. Nous l'avons fait voir dans notre conférence en produisant de l'énergie électrique par une dépense de travail et en transformant réciproquement cette énergie en vibrations calorifiques, lumineuses et sonores et en kilogrammètres.

Ces exemples feront comprendre le sens de ce mot d'énergie.

Ce serait un mot bien dangereux, si la mécanique n'en donnait une définition rigoureuse. On démontre que la demi-somme des forces vives des points d'un système, augmentée d'une certaine fonction des coordonnées, est une quantité de travail constante. Cette fonction complémentaire est donc à chaque instant égale au travail maximum que les forces pourront effectuer à partir de cet instant ; cette fonction, c'est l'énergie de position.

NOTE C.

Unités CGS.

Nous croyons utile de réunir en un tableau la valeur exacte des unités CGS :

UNITÉS FONDAMENTALES.

|               |                  |    |
|---------------|------------------|----|
| Longueur..... | Centimètre,      | C. |
| Masse .....   | Masse du gramme, | G. |
| Temps.....    | Seconde,         | S. |



UNITÉS MÉCANIQUES DÉRIVÉES.

*Unité de vitesse.*

La vitesse d'un corps se mouvant en ligne droite, d'un mouvement uniforme, parcourant un centimètre par seconde.

*Unité d'accélération*

L'accélération d'un corps animé d'un mouvement uniformément varié, dont la vitesse augmente de 1 centimètre par seconde.

A Paris, l'accélération de la pesanteur est égale à 980,94 : on écrit 981.

*Unité de force, la dyne.*

La force qui, agissant pendant une seconde sur la masse du gramme, engendre une vitesse d'un centimètre par seconde ; ou bien, qui produit l'unité d'accélération.

La dyne égale  $\frac{1}{981}$  de gramme.

*Unité de travail, l'erg.*

Le travail produit par une dyne, quand le chemin parcouru sous son action est d'un centimètre.

L'erg égale 0,00109 grammètre.

Un kilogrammètre égale 98.100.000 ergs.

Un cheval-vapeur égale 7.360.000.000 ergs par seconde.

NOTE D.

**Remarques sur les unités pratiques.**

Les valeurs des unités absolues du système électromagnétique CGS étaient malheureusement trop en désaccord avec les grandeurs que

l'on doit mesurer en pratique, et il a fallu, ainsi que nous l'avons expliqué dans notre deuxième conférence, augmenter les unes et diminuer les autres.

Ces modifications n'ont pas été faites sans règle et nous croyons utile de montrer que les unités pratiques constituent elles-mêmes un système cohérent, reposant sur trois unités fondamentales nouvelles. L'unité de longueur serait le quart du méridien terrestre; soit 10 millions de mètres. L'unité de masse serait égale à un cent millionième de la masse du milligramme, soit  $\frac{1}{10^{11}}$  de la masse du gramme. La seconde serait enfin conservée comme unité de temps.

Ces concordances se démontrent à l'aide des équations de *dimension* des unités; nous ne croyons pas utile d'en introduire la notion dans ces conférences de vulgarisation.

#### NOTE E.

##### Cohérence des unités pratiques.

Un ampère correspond à un coulomb de débit par seconde; en effet, nous avons, en fonction des unités C.G.S.,  $Q = I t$ .

$$\text{Coulomb} = 10^{-1} = \text{ampère} \times \text{temps} = 10^{-1} \cdot 1.$$

De même, un ampère résulte d'un volt par ohm :  $I = \frac{E}{R}$ .

$$\text{Ampère} = 10^{-1} = \frac{\text{volt}}{\text{ohm}} = \frac{10^8}{10^9} = 10^{-1}.$$

Enfin, un farad exige un coulomb par volt :  $C = \frac{Q}{E}$ .

$$\text{Farad} = 10^{-9} = \frac{\text{coulomb}}{\text{volt}} = \frac{10^{-1}}{10^8} = 10^{-9}.$$



NOTE F.

**Détermination de l'ohm.**

Vingt-neuf expériences, effectuées par des physiciens distingués, à l'aide de procédés différents, ont conduit à la connaissance de l'ohm, à un centimètre près. Les méthodes employées sont fondées sur des théories scientifiques, qu'on ne peut vulgariser; nous essaierons néanmoins de faire comprendre comment on parvient à déterminer l'unité pratique de résistance C.G.S.

Qu'on fasse tourner, autour d'un axe vertical, un cadre circulaire en lui donnant un mouvement uniforme de rotation; le déplacement du circuit fermé enroulé sur ce cadre produit une force électromotrice d'induction, qui dépend de l'intensité du champ magnétique au lieu de l'expérience, et qui est fonction, d'autre part, de la vitesse du déplacement et de la longueur du circuit mobile; soit  $E$  la force électromotrice ainsi développée et  $R$  la résistance du circuit mobile; l'intensité du courant produit sera égale à  $\frac{E}{R}$ .

Or, cette intensité peut être mesurée en unités absolues par la boussole des tangentes. On calcule donc  $E$ , on observe  $I$  et l'on en déduit  $R$ .

L'Association britannique avait employé ce procédé dès 1865, en le simplifiant toutefois un peu, par la suppression de la boussole des tangentes: une aiguille aimantée, suspendue par un fil de cocon au centre du cercle mobile, marquait l'intensité du courant par la déviation permanente qu'elle gardait dans l'expérience. Une rotation de 405 révolutions par minute donnait une déviation de 6 degrés environ.

On trouva pour valeur de l'ohm une longueur de 104,83 centimètres d'une colonne de mercure de 1 millimètre carré de section: ce chiffre était trop faible.

Des expériences plus récentes conduisent à estimer sa valeur théorique à 106,2 centimètres à 1 centimètre près.

La valeur de l'ohm *légal* a été fixée à 106 centimètres.

Les reproductions de l'unité de résistance se font en maillechort, en platine iridié ou en argent platiné ; ce sont des fils de 1 à 2 mètr. de long, de 5 à 8 dixièmes de millimètre de diamètre, couverts de soie blanche, enroulés sur des bobines de bois et noyés dans de la paraffine solide : ces étalons sont généralement exacts à 15 degrés.

#### NOTE G.

##### Les étalons de force électromotrice.

Le *Post-Office* de Londres emploie la pile de Daniell comme étalon, et il lui attribue une force électromotrice de 1,07 volt, le sulfate de zinc étant à moitié saturé.

Pour les recherches délicates, on se sert de la pile Latimer-Clarke, dont la force électromotrice est de 1,457 volt à 15 degrés : cette pile est formée de mercure, couvert d'une pâte obtenue en faisant bouillir du sulfate de mercure dans une solution saturée de sulfate de zinc ; une plaque de zinc repose sur cette pâte. En circuit ouvert la force électromotrice de cet élément est très constante.

Il nous paraît utile d'indiquer ici la force électromotrice des piles les plus usitées :

| PILE                  | FORCE<br>ÉLECTROMOTRICE. |
|-----------------------|--------------------------|
| Daniell.....          | 1,07 volt.               |
| Bunsen.....           | 1,80 »                   |
| Poggendorff.....      | 2,10 »                   |
| Warren de la Rue..... | 1,03 »                   |
| Leclanché.....        | 1,48 »                   |
| Reynier.....          | 1,50 »                   |
| De Lalande.....       | 0,85 »                   |
| Scrivanow.....        | 1,50 »                   |
| Cloris Baudet.....    | 2,03 »                   |

NOTE H.

**Poids des métaux libérés par ampère-heure.**

Un ampère-heure libère :

0,038<sup>gr.</sup> d'hydrogène.  
2,475 d'or.  
4,082 d'argent.  
1,190 de cuivre.  
1,125 de nickel.

NOTE I.

**La fausse science.**

On pourrait m'accuser d'être injuste envers les électriciens si je ne confirmais mon dire par quelques exemples.

Un de ces techniciens improvisés appréciait de la manière suivante les accumulateurs Faure : « Un couple de Faure peut produire un travail de 45 ampères en trois heures. » L'ampère mesure une intensité de courant et non un travail.

L'*Électricien* a découvert la perle suivante dans les faits divers d'un journal qui jouit d'une certaine renommée : « On sait qu'en employant un courant de 96 ampères, on décompose par seconde 9 milligrammes d'eau acidulée, de manière que sa résistance soit égale à celle de cent mètres de fil télégraphique. Si l'on veut se faire une idée de cette force électromotrice, on peut dire qu'elle est donnée par une batterie de cent éléments Daniell. » L'*Électricien* disait à ce propos : « Notre Revue, qui ne recule devant aucun sacrifice, donnera une récompense honnête à celui qui pourra bien lui expliquer comment une intensité peut avoir une résistance égale à une

force électromotrice. L'auteur de l'article précité peut concourir. » La critique est amère ; avec un peu de charité, on aurait pu attribuer ce galimatias à une coquille d'impression. Mais il suffirait de quelques phrases semblables pour jeter le discrédit sur les unités électriques et l'on ne s'étonne pas de l'aversion du public pour la terminologie adoptée en 1881.

NOTE J.

Valeur de EQ en ergs.

Un volt vaut  $10^8$  unités CGS.

Le coulomb vaut  $\frac{1}{10}$  d'unité CGS.

Leur produit vaut donc  $10^8 \times 10^{-1} = 10^7$  unités CGS.

$$= 10.000.000 \text{ ergs.}$$

En d'autres termes, un volt-coulomb = 10 megergs.

NOTE K.

Valeur de EQ en kilogrammètres.

Déterminons d'abord la valeur de l'erg en fonction du kilogrammètre.

L'erg (ou dyne-centimètre) est égal au produit de la dyne par le centimètre.

$$1 \text{ erg} = 1 \text{ dyne} \times 1 \text{ centimètre.}$$

Or, la dyne équivaut à  $\frac{1}{981}$  de gramme, soit à  $\frac{0,001}{981}$  kilogramme, et le centimètre égale 0,01 mètre.

Donc :

$$1 \text{ erg} = \frac{0,001}{981} \times 0,01 = \frac{0,00001}{981} \text{ kilogrammèt.} = \frac{1}{98.100.000} \text{ kilogramm.}$$

Il est dès lors facile de trouver la valeur de **EQ** en kilogrammètres.

$$EQ = \frac{10.000000}{98.100.000} = \frac{1}{9,81}.$$

En d'autres termes, un travail étant donné en volt-coulombs, on trouvera sa valeur en kilogrammètres en le divisant par **9,81** (1).

NOTE L.

**Valeur de EI en chevaux-vapeur.**

L'unité pratique de travail d'une machine industrielle est le cheval-vapeur : le cheval vaut 75 kilogrammètres par seconde.

Quelle est la valeur du volt-ampère en chevaux ?

$$\begin{aligned} EI &= EQ \text{ par seconde.} \\ &= \frac{EQ}{9,81} \text{ kilogrammètres par seconde.} \\ &= \frac{EQ}{9,81 \cdot 75} \text{ chevaux.} \\ &= \frac{EQ}{736} \text{ chevaux.} \end{aligned}$$



On transforme donc l'énergie électrique en chevaux-vapeur en divisant les volt-ampères par le nombre 736.

Le horse-power (**HP**) anglais vaut un peu plus que le cheval-vapeur français ; on passe des volt-ampères aux **HP**. en divisant par 746.

---

(1) Nous lisons dans un livre très répandu qu'il faut diviser les volt-coulombs par l'accélération de la pesanteur : c'est une erreur. L'accélération de la pesanteur, dans le système CGS, est égale à 981 et non pas à 9,81.

NOTE M.

**Bilan d'une pile de Daniell.**

Voici de quelle manière on peut évaluer théoriquement la consommation d'une pile de Daniell par cheval-heure :

Un cheval-heure équivaut à 270.000 kilogrammètres ; par conséquent :

$$270.000 = \frac{EQ}{9,81} ;$$

d'où :

$$Q = 2648700 \frac{1}{E} .$$

Il faut donc produire, dans une pile de Daniell,  $\frac{2.648.700}{1,07}$   
= 2.475.514 coulombs.

Or, un coulomb dépose 0,341 milligramme de zinc et, réciproquement, 0,341 milligramme de zinc fournit un coulomb ; la dépense théorique de zinc est donc de  $2.475.514 \times 0,000341 = 784$  gr., au lieu 2250 grammes réellement brûlés.

Par équivalent de zinc consommé, il se réduit un équivalent de sulfate de cuivre : l'équivalent du zinc est de 33, celui de la couperose bleue, 124,5 ; le poids de sulfate employé par cheval sera donc de 3.135 grammes.

Enfin, le cuivre ayant un équivalent égal à 31,5, il s'en récupérera 315 grammes pour 330 de zinc brûlé ; soit 793 grammes.

Le prix du cheval-heure théorique ressort à 4 fr. 70 environ.

En pratique, la dépense est de deux à trois fois plus grande, par suite des actions secondaires et des déchets.

MM. Erhardt et Vogler ont construit des piles Daniell transformées, à circulation de liquide, dans lesquelles la lame de cuivre est rem-

placée par une feuille de plomb ; ces piles produisent, dit-on, le cheval-heure au prix de 3 francs au plus. Ce serait un progrès.

NOTE N.

**Calcul de la force électromotrice des piles.**

L'énergie électrique des piles est empruntée aux réactions chimiques exothermiques qui s'y développent.

Cette énergie est égale à  $\frac{EI}{9,81}$  en kilogrammètres.

Or, supposons que C représente la chaleur développée par la combinaison de 1 gramme des corps dont l'affinité entre en jeu. Un ampère ou un coulomb, par seconde, correspond à un poids connu de corps combiné ; c'est 0<sup>sr</sup>00001038 d'hydrogène ou 0<sup>sr</sup>00001038 H d'un corps quelconque d'équivalent H. La chaleur qui produit l'ampère est donc 0,00001038.H.C calories ; le travail correspondant s'obtiendra en multipliant ce produit par 425, l'équivalent mécanique de la calorie en kilogrammètres.

On a donc, pour tous les corps combinés ou décomposés :

$$\frac{EI}{9,81} = \Sigma I \ 425 \ 0,00001038 \ H.C.$$

Tout calcul fait, on en tire :

$$E = \Sigma 0,043.HC = 0,043 \ \Sigma q$$

si nous appelons  $q$  les produits semblables à HC.

Appliquons cette formule à la pile de Daniell ; il se forme du sulfate de zinc, pour lequel  $q = 53,96$  calories, et il se décompose du sulfate de cuivre, avec absorption d'un nombre de calories  $q$  égal à 28,20 par équivalent.

Il vient donc :

$$\begin{aligned} E &= 0,043 (53,96 - 28,20). \\ &= 1,11 \text{ volt.} \end{aligned}$$

D'une manière générale, on peut dire qu'un volt correspond à 23 calories.

NOTE O.

**Rendement.**

Aucun mot n'a été interprété plus diversement que ce mot de rendement, et cependant sa signification est bien nette. Mais il faut bien spécifier à l'avance quels sont les phénomènes qu'on veut comparer.

Nous parlons dans le texte du rendement électrique disponible : c'est le rapport entre le travail mécanique dépensé et l'énergie électrique disponible entre les bornes du générateur dans le circuit extérieur. Les industriels ne veulent pas connaître d'autre rendement que celui-là, et ils ont raison.

Mais un générateur fournit une quantité d'énergie électrique plus grande que celle qui est immédiatement disponible entre ses bornes ; une partie de l'énergie qu'il produit est employée en pure perte à échauffer le fil de l'induit et de l'inducteur. La formule de Joule permet de le calculer ; appelant  $r$  la résistance intérieure du générateur, il s'y transforme  $\frac{I^2 r}{9,81}$  en calories. Dans l'exemple cité dans le texte, l'énergie totale produite est égale à 268,42 kilogrammètres, et le rendement devient égal à  $\frac{268,42}{299} = 87$  pour cent.

Ce rendement présente de l'intérêt quand on se propose de comparer entre elles les différentes machines dynamos.

NOTE P.

**Dynamos Compound.**

Les électro-aimants des machines dynamo-électriques peuvent



être excités par le courant de la machine elle-même, mais il y a trois manières spéciales d'opérer :

1<sup>o</sup> Les bobines des électros sont intercalées dans le circuit, à la suite de l'induit ; la machine est dite excitée en série, et on l'appelle *série-dynamo*.

2<sup>o</sup> Deux circuits sont branchés sur les balais ; l'un est le circuit extérieur, l'autre forme l'inducteur des électros ; ce dernier doit être très résistant. L'excitation est donc obtenue par une dérivation prise sur le circuit ; ces machines s'appellent *shunt-dynamos*.

3<sup>o</sup> On peut imaginer un système mixte, formé par la combinaison des deux précédents, en excitant les électros en partie par le courant principal, en partie par une dérivation prise sur les balais. Nous venons de décrire les *dynamos Compound*.

#### NOTE Q.

##### Distribution à volts constants.

Par le seul fait que la différence de potentiel reste la même entre les extrémités de tous les circuits dérivés, il se produit une certaine accommodation du débit aux besoins des circuits. Ainsi, prenons le cas d'une chute de 100 volts et imaginons que dans une dérivation on place un régulateur à arc, dont la résistance soit de 5 ohms, tandis qu'une autre dérivation recevrait une lampe à incandescence de 100 ohms de résistance. Le régulateur sera traversé par un courant de  $\frac{100}{5} = 20$  ampères, tandis que la lampe ne recevra que  $\frac{100}{100} = 1$  ampère. Dans le premier circuit, la dépense d'énergie sera de 2000 watts, elle ne sera que de 100 watts dans le second. Le débit de canalisation varie donc avec la résistance des récepteurs ; un courant ayant une tension de 100 volts peut être utilisé à faire parler une sonnerie, pourvu que l'électro de cet appareil soit suffisamment résistant.

Ces observations ont déjà été mises à profit pour les distributions d'électricité faites en vue de l'éclairage, et elles faciliteront beaucoup la solution du problème général.

NOTE R.

**Transport de l'énergie à distance.**

M. Gérard, de Liège, estime, de la manière suivante, le prix de revient du cheval-heure, produit au prix de 0,8 centimes par un moteur hydraulique, et transporté à des distances variables par l'eau, l'air comprimé, les câbles ou l'électricité. Il s'agit d'une force totale de 100 chevaux.

| DISTANCES.      | EAU.  | AIR.  | CABLE. | ÉLECTRICITÉ. |
|-----------------|-------|-------|--------|--------------|
|                 | fr.   | fr.   | fr.    | fr.          |
| 100 mètres..... | 0,016 | 0,022 | 0,009  | 0,021        |
| 1000 — .....    | 0,020 | 0,025 | 0,011  | 0,024        |
| 5000 — .....    | 0,045 | 0,037 | 0,029  | 0,027        |
| 20000 — .....   | 0,119 | 0,086 | 0,124  | 0,047        |

Ce travail d'un cheval-heure, fourni par une force naturelle et porté à 20 kilomètres, coûte donc moins au lieu de réception que le même travail produit sur place par une machine à vapeur. On pourrait peut-être discuter quelques-uns des chiffres de M. Gérard, mais le résultat de comparaison est acquis. L'intérêt et l'amortissement des machines a été calculé à raison de 14 pour cent.