N° D'ORDRE
327.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR M. JULES VIOLLE,

ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE, AGRÉGÉ DES SCIENCES PHYSIQUES.

1re THÈSE. — SUR L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR.

2e THÈSE. — TRAVAUX DE M. PASTEUR SUR LES FERMENTATIONS.

Soutenues le 19 août 1870, devant la Commission d'Examen.

MM. DESAINS, *Président.*

BRIOT, } *Examinateurs.*

TROOST, }

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DE L'ÉCOLE IMPÉRIALE POLYTECHNIQUE, DU BUREAU DES LONGITUDES,

SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER,

Quai des Augustins, 55.

1870

ACADÉMIE DE PARIS.

FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS.

DOYEN	MILNE EDWARDS, Professeur.	Zoologie, Anatomie, Physiologie.
PROFESSEURS HONORAIRES	DUMAS.	
	BALARD.	
PROFESSEURS	DELAFOSSE	Minéralogie.
	CHASLES	Géométrie supérieure.
	LE VERRIER	Astronomie.
	DELAUNAY	Mécanique physique.
	P. DESAINS	Physique.
	LIOUVILLE	Mécanique rationnelle.
	HÉBERT	Géologie.
	PUISEUX	Astronomie.
	DUCHARTRE	Botanique.
	JAMIN	Physique.
	SERRET	Calcul différentiel et intégral.
	H. Ste-CLAIRE DEVILLE	Chimie.
	PASTEUR	Chimie.
	LACAZE DUTHIERS	Anatomie, Physiologie comparée, Zoologie.
	BERT	Physiologie.
	HERMITE	Algèbre supérieure.
	BRIOT	Calcul des probabilités, Physique mathématique.
AGRÉGÉS	BERTRAND	Sciences mathématiques.
	J. VIEILLE	Sciences mathématiques.
	PELIGOT	Sciences physiques.
SECRÉTAIRE	PHILIPPON.	

Paris. — Imprimerie de GAUTHIER-VILLARS, successeur de MALLET-BACHELIER,
Rue de Seine-Saint-Germain, 10, près l'Institut.

A MON PÈRE, A MA MÈRE.

A LA MÉMOIRE

DE

M. VERDET.

JULES VIOLLE.

PREMIÈRE THÈSE.

SUR

L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR.

HISTORIQUE.

Le principe de l'équivalence du travail et de la chaleur est dû à Mayer (1); Joule de son côté l'a formulé presque à la même époque (2) et l'on peut dire qu'une science nouvelle fut dès lors fondée. L'attention en effet se reporta aussitôt sur le principe énoncé vingt ans auparavant par Sadi Carnot (3); et bientôt le principe de Carnot, généralisé par Clausius (4), s'adjoignit au principe de Mayer pour constituer les bases de ce que l'on appelle la *théorie mécanique de la chaleur* d'un nom un peu prématuré peut-être, mais que l'on aime, après tout, à conserver pour les promesses qu'il renferme.

Les deux principes fondamentaux posés par Mayer et Sadi Carnot ont en effet singulièrement modifié les idées admises jusqu'alors sur la nature de la chaleur. Les conséquences qu'ont su en déduire Helmholtz, Clausius, Joule, William Thomson, Macquorn Rankine et Hirn furent à

(1) MAYER, *Die organische Bewegung und der Stoffwechsel*; Heilbronn, 1845.
(2) *Philosophical Transactions*, p. 61; 1850.
(3) CARNOT, *Réflexions sur la puissance motrice du feu*; 1824.
(4) *Poggendorff's Annalen*, t. XCIII, p. 481; 1854.

juste titre remarquées du monde savant; quelques-unes même ont déjà amené dans la mécanique industrielle des réformes importantes. Mais le point essentiel de toute application des principes nouveaux est évidemment d'avoir une valeur exacte du coefficient numérique entrant dans le théorème de Mayer, c'est-à-dire de l'équivalent mécanique de la chaleur. Aussi les recherches dirigées de ce côté sont-elles déjà nombreuses, surtout si l'on considère combien est encore rapprochée de nous l'époque où Mayer a, pour la première fois, formulé l'équivalence du travail et de la chaleur.

Ces recherches ont été faites à différents points de vue; il est en effet évident, d'après la généralité même du principe, que par des voies bien diverses on peut également arriver à fixer la valeur numérique de l'équivalent mécanique de la chaleur; et il ressort de cette heureuse possibilité un précieux moyen de contrôler les résultats individuellement obtenus par chaque expérimentateur. Je vais rappeler ces résultats, mais je serai très-bref sur ce sujet que j'ai traité ailleurs en détail (1).

L'exemple le plus saillant peut-être de la transformation du travail en chaleur nous est fourni par le frottement. Dès 1798, le comte de Rumford, frappé de la chaleur énorme qui se dégage dans le forage des canons, avait institué à la fonderie royale de Munich une expérience restée célèbre : en utilisant la seule chaleur produite par le frottement d'une sorte de pilon contre le fond d'un cylindre creux de fer, il avait réussi, au bout de deux heures et demie, à faire bouillir une masse d'eau de plus de 10 litres (2). M. Joule a, le premier, mesuré exactement la chaleur dégagée par le frottement et l'a comparée au travail absorbé (1849) (3); ses expériences très-nombreuses et

(1) *Œuvres de Verdet*, t. VII et VIII, en collaboration avec Prudhon.
(2) *Philosophical Transactions abridged*, t. XVIII, p. 286.
(3) *Philosophical Transactions*, p. 61; 1850.

très-soignées ont porté sur l'eau, le mercure et la fonte de fer, et lui ont donné pour l'équivalent mécanique de la chaleur 424,9, comme moyenne d'un grand nombre de résultats bien concordants. La valeur ainsi déterminée coïncide presque avec celle que M. Joule lui-même avait déjà trouvée en 1843 en étudiant le frottement de l'eau dans les tubes étroits (1). Plus tard, M. Favre mesura à l'aide de son appareil calorimétrique la chaleur dégagée dans le frottement de l'acier contre lui-même et en déduisit 413 comme valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur (2). Vers la même époque, M. Hirn publia aussi le résultat de recherches analogues (3) : le frottement des liquides lui avait donné 432 et l'écrasement du plomb, 425. On ne pourrait toutefois méconnaître que toutes les expériences sur le frottement présentent des difficultés presque insurmontables; la mesure du travail est surtout délicate, car tout le travail dépensé n'est pas converti en chaleur : une portion plus ou moins notable se perd sous la forme de force vive sensible (trépidations, vibrations sonores), sans qu'il soit possible de l'évaluer. On ne doit donc pas être surpris des légères différences qu'offrent entre eux les nombres obtenus par cette méthode.

Si dans le frottement on voit un exemple très-net de la transformation du travail en chaleur, la transformation inverse de la chaleur en travail apparaît avec plus d'évidence encore dans les machines thermiques et en particulier dans la machine à vapeur. M. Hirn a réussi à mesurer avec toute l'exactitude possible et la chaleur communiquée à la chaudière d'une machine à vapeur et le travail total fourni par cette machine (4). Ces expériences, faites sur les

---

(1) *Philosophical Magazine*, 3e série, t. XXIII, p. 442; 1843.

(2) *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XLVI, p. 337; 1858.

(3) Hirn, *Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur*, p. 1; 1858.

(4) Hirn, *loc. cit.*, p. 20.

puissantes machines à vapeur d'une filature des environs de Colmar, ne pouvaient évidemment conduire à une valeur exacte de l'équivalent mécanique de la chaleur (M. Hirn a trouvé 398), mais elles ont eu une importance capitale dans l'établissement et dans la vulgarisation de la théorie actuelle de la chaleur.

La machine à vapeur n'est pas le seul moteur thermique qu'emploie l'industrie. Les machines électro-magnétiques aussi sont des machines thermiques, empruntant leur puissance à la chaleur dégagée par la dissolution du zinc dans chaque élément de la pile et transportée par le courant dans tout le circuit. Les expériences de M. Favre [1] ont prouvé de la manière la plus nette que c'est aux dépens d'une certaine quantité de cette chaleur que la machine magnéto-électrique donne naissance à un travail mécanique; et, en mesurant ce travail ainsi que la déperdition de chaleur correspondante, M. Favre a trouvé une nouvelle valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur, 443. Cette valeur ne doit pas différer beaucoup de la valeur exacte. On peut toutefois remarquer que ces mesures sont extrêmement délicates et que, dans l'expérience de M. Favre, l'équivalent cherché ayant pour expression le quotient de 131,4 : 0,296, le diviseur 0,296 étant lui-même la différence de deux quantités de chaleur mesurables à peine à 1 millième près, la différence peut parfaitement être erronée de $0^{u},02$; et il suffirait d'admettre cette erreur pour déduire des travaux de M. Favre le nombre 435. Il est même possible d'établir la valeur numérique de l'équivalent par la simple mesure de la chaleur dégagée dans un fil que traverse un courant électrique. En effet, d'après la loi de Joule [2], on sait que la chaleur dégagée par un courant est proportionnelle au

---

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XL, p. 293; 1854.
[2] *Philosophical Magazine*, 3e série, t. XIX, p. 260; 1841.

produit du carré de l'intensité du courant par la résistance du circuit; d'autre part M. Clausius a montré que le coefficient de proportionnalité est précisément l'inverse de l'équivalent mécanique de la chaleur (1). Si donc on mesure à la fois la chaleur dégagée par un courant et l'intensité du courant ainsi que la résistance du circuit, on pourra facilement en déduire l'équivalent cherché. C'est ce qu'a fait M. de Quintus Icilius (2), en mettant surtout à profit les grands travaux de Weber (3) sur la mesure absolue des courants; il a ainsi trouvé 392, valeur assez différente de la valeur probable; mais la différence n'excède pas les limites d'incertitude que comportent le grand nombre d'éléments que l'on a dû déterminer et la difficulté de leur détermination.

Au lieu de tirer son origine de réactions chimiques s'accomplissant dans des éléments de pile, cette chaleur des courants électriques peut être elle-même une transformation directe de travail mécanique. C'est ce qui arrive lorsque, en dépensant un certain travail, on force un corps conducteur à se déplacer en présence d'un aimant ou d'un courant. L'échauffement qui se produit dans ces conditions a été mesuré par M. Joule, tout au début de la science nouvelle, sur un tube plein d'eau tournant entre les branches d'un électro-aimant (4). Telle est la méthode qui a conduit à la première détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur. Le nombre donné par M. Joule, 460, est même remarquablement approché; mais les diverses valeurs dont ce nombre est la moyenne ne sont pas très-concordantes; elles oscillent entre 322 et 572. Cela tient sans doute à ce que l'évaluation de la chaleur n'était

(1) *Poggendorff's Annalen*, t. LXXXVII, p. 415; 1852.

(2) *Poggendorff's Annalen*, t. CI, p. 69; 1857.

(3) Weber, *Electrodynamische Maasbestimmungen* (*Mémoires de la Société royale Saxonne des Sciences*, Leipzig, t. V; 1856).

(4) *Philosophical Magazine*, 3e série, t. XXIII, p. 263, 347 et 435; 1843.

pas faite d'une façon suffisamment exacte : la correction adoptée pour tenir compte du refroidissement est un peu incertaine; en outre, ce qui est plus grave, la température de l'eau du tube était mesurée sur deux thermomètres plongeant aux deux extrémités du tube, et rien ne garantit que la température soit la même dans tous les points du liquide. Il est au contraire infiniment probable que, avec la vitesse constante de rotation, il s'établit un état stationnaire dans lequel la température varie régulièrement du centre aux extrémités. M. Le Roux a repris ces expériences en opérant sur les puissantes machines électro-magnétiques de la Compagnie *l'Alliance* [1], et il a trouvé pour l'équivalent mécanique de la chaleur les nombres 442, 462 et 470, dont la moyenne est 458; toutefois, la méthode qu'il a employée pour évaluer la chaleur est encore très-incertaine. Mais déjà Foucault avait donné à l'expérience de M. Joule une forme remarquable, sous laquelle l'échauffement devient manifeste en très-peu de temps; c'est à l'aide de l'appareil de Foucault que j'ai entrepris mes recherches.

Avant de les exposer, je dois encore indiquer des travaux très-importants faits sur le même sujet d'après une méthode complétement différente. Des propriétés générales des gaz on peut en effet déduire la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur, au moyen de la formule connue

$$E = \frac{\alpha p_0 v_0}{C - c}.$$

M. Regnault a fait connaître exactement la densité, le coefficient de dilatation et la chaleur spécifique sous pression constante pour l'air, l'hydrogène et l'acide carbonique; enfin, l'incertitude qui a si longtemps existé sur les valeurs de c, vient aussi de disparaître grâce encore à

(1) *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XLV, p. 414; 1857.

M. Regnault, qui, par l'étude de la propagation du son dans les gaz, a trouvé pour $m = \frac{C}{c}$ la valeur 1,3945; il en résulte pour l'équivalent mécanique de la chaleur 436,08.

M. Joule a encore cherché à déterminer cet équivalent par les phénomènes thermiques qui accompagnent la détente des gaz (1), et il a obtenu 452,5 et 437,2, dans une première série d'expériences; 450,9; 447,6 et 417,9 dans une seconde. MM. Tresca et Laboulaye se sont également occupés de ce sujet (2), et leurs expériences les ont conduits à fixer à 433 l'équivalent mécanique de la chaleur. Depuis, M. Regnault a repris cette question, mais il n'a pas encore publié les résultats auxquels il est arrivé.

Si à tous ces travaux nous joignons les recherches récentes de M. Edlund sur la mesure des effets calorifiques qui se produisent pendant le changement de volume des métaux (3) et desquelles résulte 431 comme valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur, nous aurons la liste à peu près complète des déterminations de cet équivalent.

MÉTHODE EMPLOYÉE.

Je me suis proposé de déterminer l'équivalent mécanique de la chaleur par la mesure du phénomène thermique qui se manifeste quand on fait agir un aimant sur un corps conducteur en mouvement. La disposition la meilleure pour produire ce phénomène est incontestablement celle que Foucault a adoptée dans une expérience célèbre. Je cite textuellement (4):

« Entre les pôles d'un fort électro-aimant, j'ai partiel-

(1) *Philosophical Magazine*, 3e série, t. XXVI, p. 369; 1845.

(2) *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LVIII, p. 358; 1864.

(3) *Poggendorff's Annalen*, t. CXXVI, p. 539; 1865.

(4) *Annales de Chimie et de Physique*, 3e série, t. XLV, p. 316; 1855.

lement engagé le solide de révolution appartenant à l'appareil rotatif que j'ai nommé *gyroscope*, et qui m'a précédemment servi pour des expériences d'une tout autre nature. Ce solide est un tore de bronze, relié par un pignon denté à un rouage moteur, et qui, sous l'action de la main armée d'une manivelle, peut ainsi prendre une vitesse de 150 à 200 tours par seconde. Pour rendre plus efficace l'action de l'aimant, 2 pièces de fer doux, surajoutées aux bobines, prolongent les pôles magnétiques et les concentrent au voisinage du corps tournant.

» Quand l'appareil est lancé à toute vitesse, le courant de 6 couples Bunsen, dirigé dans l'électro-aimant, éteint le mouvement en quelques secondes, comme si un frein invisible était appliqué au mobile : c'est l'expérience d'Arago [1], développée par M. Faraday. Mais si alors on pousse à la manivelle pour restituer à l'appareil le mouvement qu'il a perdu, la résistance qu'on éprouve oblige à fournir un certain travail dont l'équivalent reparaît et s'accumule effectivement en chaleur à l'intérieur du corps tournant.

» Au moyen d'un thermomètre qui plonge dans la masse, on suit pas à pas l'élévation progressive de la température. Ayant pris, par exemple, l'appareil à la température ambiante de 16 degrés centigrades, j'ai vu successivement le thermomètre monter à 20, 25, 30 et 34 degrés, mais déjà le phénomène était assez développé pour ne plus réclamer l'emploi des instruments thermométriques. La chaleur produite était devenue sensible à la main.

» Quelques jours après, la pile étant réduite à 2 couples, un disque plat, formé de cuivre rouge, s'est élevé, en deux minutes d'action, à la température de 60 degrés. »

Cette expérience se prête admirablement à une mesure de l'équivalent mécanique de la chaleur. Deux conditions,

---

[1] *Annales de Chimie et de Physique*, 2e série, t. XXIII, p. 213; 1826.

en effet, sont nécessaires et suffisantes pour que la chaleur dégagée dans l'expérience soit l'équivalent exact du travail utile dépensé pour maintenir une rotation uniforme :

1° Il faut que le disque soit, à la fin, revenu au même état qu'au commencement;

2° Il faut que l'échauffement du disque soit le seul effet produit.

Or, ces deux conditions sont satisfaites.

1° Considérons le commencement et la fin de l'expérience. A ces deux époques, le disque est rigoureusement dans les mêmes conditions physiques, excepté quant à sa température et aux effets qui en dépendent. Lors donc que, par l'immersion dans le liquide calorimétrique, ce disque sera ramené à la température initiale ou à une température en différant infiniment peu, il sera identiquement ce qu'il était avant l'opération.

2° Que, pour le moment, on fasse abstraction de l'axe (dont l'influence peut être évaluée à part, comme nous le verrons plus loin), l'appareil se réduit à un disque tournant librement dans l'air, sans aucun frottement contre des corps extérieurs, si ce n'est le frottement contre l'air environnant, frottement insignifiant par suite de la grande mobilité de ce fluide et de la symétrie parfaite du corps en mouvement. Si donc on mesure le travail utile employé à entretenir ce mouvement, il semble tout d'abord certain que l'échauffement du disque est le seul phénomène correspondant à la dépense observée.

Cette proposition paraît, en effet, incontestable, quand on ne considère, comme nous venons de le faire, que les phénomènes qui s'offrent à nos regards : mouvement du disque entretenu à l'aide d'une dépense continuelle de travail, et échauffement graduel de ce même disque pendant toute la durée de la rotation. Mais si l'on examine de plus près les choses, une objection sérieuse se présente bientôt à l'esprit, objection que Joule s'est faite à lui-même, tout en la formulant d'une façon assez obscure, et par laquelle il s'est efforcé d'expliquer le singulier désaccord de ses expériences sur le sujet qui nous occupe. Nous avons, en effet, négligé jusqu'ici un phénomène intermédiaire : le mouvement ne se transforme en chaleur qu'à l'aide de l'électricité. L'action immédiate de l'électro-aimant sur le disque en mouvement est d'y développer, par induction, des courants électriques; et ce sont ces courants qui échauffent le disque. Mais, s'il est vrai que le travail dépensé pour maintenir le disque en mouvement se retrouve tout entier sous la forme d'électricité, est-il certain que toute cette électricité se transforme en chaleur? Pour que cela soit, il faut que le seul effet produit par ces courants soit l'échauffement du disque, et si ces courants, enfermés dans le disque, ne peuvent causer ici ni phénomènes lumineux, ni phénomènes mécaniques perturbateurs, n'a-t-on pas à craindre qu'ils ne donnent naissance à des phénomènes d'induction, en créant, par influence, des courants électriques dans les deux masses polaires de l'électro-aimant? C'est ce que j'ai cherché à reconnaître directement. On trouvera plus loin le détail des expériences que j'ai instituées à cet effet et qui m'ont prouvé que, dans les conditions où je me suis placé, cette cause d'erreur, si elle existe, est complétement inappréciable. La raison de ce fait me semble au surplus évidente : à chaque expérience, dès que le disque a atteint la vitesse uniforme que l'on maintient ensuite pendant toute la durée de la rotation, les courants électriques développés par induction dans ce disque conservent une intensité constante et gardent dans l'espace une position invariable. On peut donc considérer ces courants, sur la forme et la distribution desquels je ne préjuge rien d'ailleurs, comme absolument fixes aussitôt que l'équilibre est obtenu, et c'est le déplacement de la matière du disque, par rapport à ces courants, qui détermine l'échauffement observé. Mais si les courants ne changent ni d'intensité, ni de position, il ne doit y avoir aucun effet d'induction produit sur les masses conductrices extérieures, ainsi que l'expérience me l'a montré.

Le principe de la méthode étant ainsi justifié, j'entre maintenant dans le détail des expériences.

DESCRIPTION DES APPAREILS.

Je décrirai d'abord les appareils dont j'ai fait usage, puis j'indiquerai, d'une manière générale, les procédés qui m'ont servi à mesurer : 1° le travail utile nécessaire pour conserver au disque une vitesse déterminée pendant un temps donné; 2° la chaleur alors développée. Enfin, j'exposerai les résultats que j'ai obtenus dans les diverses conditions où je me suis placé.

L'appareil de Foucault que j'ai employé appartient au Cabinet de l'École Normale : il a été construit par Ruhmkorff avec cette perfection qui caractérise tous les appareils sortant des ateliers de cet habile constructeur. L'appareil se compose essentiellement d'un disque métallique de $0^m,078$ de diamètre et $0^m,008$ d'épaisseur, monté sur un axe d'acier et pouvant tourner entre les deux pôles d'un fort électro-aimant. Les extrémités de l'axe s'appuient sur deux pointes d'acier, et le frottement de l'axe sur ces supports est ainsi rendu très-faible, sans que l'appareil perde en rien la solidité qui est indispensable si l'on veut imprimer au disque de grandes vitesses. La rotation du disque s'obtient au moyen d'un système d'engrenages et d'une manivelle à laquelle on pousse à la main : un tour de la manivelle correspond à 152,8 tours de l'axe. Il est donc facile de communiquer au disque des vitesses de rotation considérables.

Il était indispensable, pour les expériences que j'avais en vue, de pouvoir séparer le disque de l'axe après la rotation; il fallait en outre que cette séparation se fît facilement et promptement, le disque étant cependant solidement réuni à l'axe pendant la rotation; il fallait aussi, pour éviter toute perte de chaleur par conductibilité, que le disque fût isolé de l'axe aussi parfaitement que possible. Après plusieurs essais, je me suis arrêté à la disposition suivante qui m'a donné de bons résultats. Sur l'axe d'acier est invariablement fixé un petit anneau de caoutchouc durci. Cet anneau se compose de deux parties de diamètre différent, et il peut pénétrer dans un trou de même forme, percé au centre du disque; trois petites goupilles implantées dans la partie large du trou du disque s'engagent alors dans des cavités correspondantes, creusées dans le caoutchouc durci, et empêchent tout glissement du disque sur l'anneau; enfin, les deux pièces sont encore réunies par un petit verrou qui, toujours poussé par la force centrifuge pendant la rotation, maintient définitivement le disque. Pour séparer le disque de l'axe, il suffit de tirer le petit verrou et de donner un coup sec sur l'axe : le disque tombe alors sur trois fils de soie tendus en triangle équilatéral dans un anneau de laiton; cet anneau lui-même est soutenu par trois autres fils de soie, et constitue ainsi un petit support commode pour recevoir le disque après l'échauffement et le porter dans le calorimètre.

Dans toutes mes expériences, l'électro-aimant était animé par le courant de 12 éléments Bunsen; ce courant traversait en outre un interrupteur, un rhéostat de Wheastone et une spirale plate placée à 60 centimètres de distance environ d'un excellent galvanomètre à réflexion de Weber. Ce galvanomètre, également construit par Ruhmkorff, se compose d'un aimant cylindrique creux très-faible, porté par un paquet de fils de cocon; sur ces fils, à une certaine hauteur au-dessus du barreau, est fixé un miroir dans lequel se réfléchit l'image d'une règle divisée en millimètres, placée dans mes expériences à $1^m,50$ de distance. Une lunette installée au-dessus de cette règle vise l'image réfléchie; cette lunette est munie d'un réticule, et elle grossit dix ou douze fois : il est donc facile d'estimer, dans la lecture, le $\frac{1}{10}$ de division. La déviation, comptée à partir d'un point de départ un peu variable d'un jour à l'autre, a été constamment maintenue à une valeur de 225 divisions, à $\frac{1}{2}$ division près. On a d'ailleurs eu soin d'alterner les mesures de travail, aussi bien que les mesures de chaleur, de façon à se mettre à l'abri des variations du magnétisme terrestre; mais ces variations sont, comme on le sait, toujours très-faibles, et n'ont pas, en général, paru sensibles avec ce mode d'opération.

EXPÉRIENCES AVEC LE CUIVRE.

Les expériences les plus nombreuses et les plus complètes ont été faites avec un disque de cuivre rouge. Je les décrirai en détail.

I. — *Mesure du travail.*

La mesure du travail nécessaire pour faire tourner le disque soumis à l'action de l'électro-aimant a été obtenue de la manière suivante.

Dans cette première partie des expériences, le disque, au lieu d'être mis en mouvement à la main par l'intermédiaire de la manivelle et du système d'engrenages employés par Foucault, tournait sous l'action d'un poids attaché à un fil de soie fin que l'on avait directement enroulé sur l'axe même du disque. Pour rendre cet axe indépendant du système d'engrenages, il suffisait de le retourner bout pour bout; le pignon, fixé sur l'axe, n'agissait plus dès lors sur la dernière roue de rencontre, et les résistances passives étaient ainsi réduites au très-faible frottement des deux extrémités de l'axe contre les pointes d'acier qui le supportent. Le fil se déroulait sous l'action du poids moteur, et l'on suivait le mouvement au moyen de

3

repères marqués sur le fil. A l'aide d'un chronomètre pointeur, on notait les époques du passage de ces repères devant le point de croisement des fils du réticule d'une lunette-viseur. On reconnaissait facilement quand le mouvement était devenu uniforme, puisqu'alors le rapport entre la longueur du fil déroulée pendant un certain temps et le temps employé à ce déroulement était constant. La hauteur de chute dont on disposait était d'environ 10 mètres, et l'uniformité du mouvement s'établissant toujours très-vite, on a pu opérer dans des limites assez étendues.

Le tableau suivant indique les temps observés pour le déroulement d'une même longueur de fil comprise entre deux repères dont la distance, mesurée soigneusement, s'est trouvée être de $1^{m},4845$:

Charges...	20^{gr}	50^{gr}	100^{gr}	200^{gr}	500^{gr}
Durées....	$102^{s},50$	$29^{s},00$	$13^{s},25$	$6^{s},25$	$2^{s},47$

Mais les charges inscrites dans la première ligne de ce tableau ne sont pas tout entières utilisées à produire le mouvement du disque. Le mouvement de l'axe consomme, lorsque l'électro-aimant fonctionne, un certain travail qui, la vitesse étant devenue uniforme, peut s'évaluer par l'attribution à cet effet d'une certaine fraction de la charge employée. J'ai donc cherché les charges nécessaires pour produire le mouvement de l'axe seul, le disque étant enlevé et le courant animant toujours l'électro-aimant. Cette condition est indispensable. Lorsque l'électro-aimant ne fonctionne pas, le plus faible poids fait immédiatement tourner l'axe, soit seul, soit portant le disque.

Voici, avec les mêmes vitesses que précédemment, les charges nécessaires pour faire tourner l'axe seul soumis à l'action de l'électro-aimant :

$8^{gr},25$ $8^{gr},65$ $8^{gr},75$ $8^{gr},80$ $11^{gr},00$

On doit donc corriger ainsi le premier tableau, en inscrivant les charges qui causent réellement le mouvement du disque :

Charges....	$11^{gr},75$	$41^{gr},35$	$91^{gr},25$	$191^{gr},10$	$489^{gr},00$
Durées.....	$102^{s},50$	$29^{s},00$	$13^{s},25$	$6^{s},25$	$2^{s},47$

La loi qui lie ces deux séries de nombres est très-simple, car le produit de la charge par la durée de la chute est un nombre constant :

1204,37 1199,15 1209,06 1194,37 1207,83

Moyenne.......... .. 1202,96

Cette loi, donnée par l'expérience, conduit à une conséquence importante. Soit P la charge pour laquelle la longueur $1^{m},4845$ met un temps t à se dérouler; on a, d'après ce qui précède,

$$Pt = 1202,96.$$

Mais, d'autre part, si l'on appelle v la vitesse d'un point du fil qui se déroule, laquelle est proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation ω, on a

$$vt = 1,4845.$$

De ces deux équations on déduit

$$\frac{P}{v} = \frac{1202,96}{1,4845}.$$

Soit maintenant ϖ le travail effectué pendant l'unité de temps par le poids qui tombe; la longueur du fil qui se déroule pendant l'unité de temps sous la charge P est $\frac{1,4845}{t}$.

Par suite

$$\varpi = P\,\frac{1,4845}{t}$$
$$= \frac{v \times 1202,96}{t}$$
$$= \frac{v^2 \times 1202,96}{1,4845}.$$

Le travail ϖ est donc proportionnel au carré de la vitesse v et par suite proportionnel au carré de la vitesse de rotation.

Ce résultat est une conséquence forcée de la loi de Neumann, d'après laquelle l'intensité des courants induits développés dans un corps conducteur qui se déplace en présence d'un aimant, est proportionnelle à la vitesse du déplacement. Chacun des courants d'induction qui circulent dans le disque tournant doit donc, d'après Neumann, avoir une intensité proportionnelle à la vitesse de rotation du disque; mais, d'après la loi d'Ampère, l'action de l'aimant sur chacun de ces courants est proportionnelle à l'intensité de ce courant. La résultante totale des actions de l'aimant sur tous les courants de forme quelconque circulant dans le disque doit donc être proportionnelle à la vitesse de rotation du disque. La résistance opposée par l'aimant est donc proportionnelle à la vitesse et peut se représenter par $k\omega$, ω étant la vitesse angulaire à un instant quelconque, et, lorsque cette résistance, sans cesse croissante, sera devenue capable d'équilibrer la force motrice, on aura

$$k\omega = \text{P},$$

c'est-à-dire que la vitesse que possède le disque à cet instant et qu'il conservera ensuite indéfiniment, est proportionnelle au poids moteur, ce qui est précisément la loi que l'expérience indique.

Ainsi, pour entretenir le disque dans un état de rotation uniforme, il faut, pendant chaque unité de temps, dépenser une quantité de travail proportionnelle au carré de la vitesse de rotation, et les expériences précédentes déterminent la valeur numérique du coefficient de proportionnalité.

Calculons ce travail pour une vitesse donnée, en employant à ce calcul la valeur moyenne 1202,96 du produit Pt.

Sous la charge utile de $191^{\text{gr}},10$, la longueur de fil,

$1^m,4845$ met, d'après cette valeur moyenne, $6^s,29$ à se dérouler ; d'autre part, le nombre de tours de l'axe pendant le déroulement de cette longueur ($1^m,4845$) est $57^t,365$, ce qui, avec la vitesse actuelle, correspond à $547^t,20$ à la minute, et le travail accompli pendant cette minute est

$$0,19110 \times 1,4845 \times \frac{60}{6,29}.$$

Pour 15 minutes, le travail T sera

$$T = 0,19110 \times 1,4845 \times \frac{60}{6,29} \times 15 = 40^{kgm},585.$$

D'après cela, le travail nécessaire pour maintenir pendant quinze minutes une vitesse de rotation de $611^t,2$ à la minute (ce qui correspond à une vitesse de 4 tours de la manivelle dans le même temps) est $50^{kgm},640$.

II. — *Mesure de la chaleur.*

La quantité de chaleur développée dans le disque, pendant chaque expérience, a été déterminée ainsi qu'il suit.

Avant l'expérience, le disque séparé de l'axe était plongé dans un bain d'eau. De ce bain, soigneusement agité, on prenait 150 centimètres cubes que l'on introduisait dans un calorimètre ordinaire de M. Regnault. Puis on retirait le disque du calorimètre, on l'essuyait rapidement, on le fixait sur l'axe et on l'installait sur l'appareil de Foucault. On le faisait alors tourner à la main pendant un temps que mesurait un chronomètre pointeur ; on comptait d'ailleurs le nombre de tours de la manivelle pendant ce même temps. Le disque était alors enlevé de l'appareil de Foucault, séparé de l'axe, comme il a été indiqué plus haut, puis porté dans le calorimètre. La température de l'eau du calorimètre que l'on avait pris soin de relever, au moment même d'immerger le disque, était mesurée au moyen d'un excellent thermomètre, construit par M. Baudin et donnant le $\frac{1}{200}$ de degré. Les lectures étaient faites avec un cathétomètre placé à $0^m,5$ de distance, et à l'aide duquel on pouvait sans peine évaluer le $\frac{1}{10}$ de division; la tige du thermomètre est, en effet, divisée en dixièmes de degré, et l'écartement de deux traits consécutifs est d'un peu plus de 1 millimètre. Chaque lecture de température n'était faite qu'après agitation régulière de l'eau, l'expérience nous ayant montré bien vite l'importance de cette précaution, importance si bien signalée dans les Mémoires de M. Jamin. A partir de l'immersion, on agitait constamment le liquide, et l'on notait la température stationnaire qui s'établissait promptement. On continuait ensuite à suivre le thermomètre pendant cinq minutes, pour déterminer la valeur du refroidissement.

Voici le détail d'une expérience :

Température de l'atmosphère : 22 degrés.

	Heure.	Température du calorimètre.
	h m	°
Avant l'immersion du disque.	6.34	21,450
	6.35	21,450
	6.36	21,445
	6.37	21,445
	6.38	21,445
	6.39	21,440
Après l'immersion du disque.	6.40	22,760
	6.41	22,740
	6.42	22,710
	6.43	22,690
	6.44	22,670
	6.45	22,655

Pendant la première phase de l'expérience, c'est-à-dire de $6^h 34^m$ à $6^h 39^m$, la température de l'eau du calorimètre a été constamment en baissant, quoique le contact avec l'air extérieur plus chaud dût amener un échauffement. Ce refroidissement tient à la perte de chaleur par suite de l'évaporation sensible à cette température de 22 degrés. Si donc nous appelons A le coefficient de refroidissement, et r la chaleur perdue par évaporation pendant une minute, nous avons

$$0,010 = -A.5.0,555 + \frac{5}{M} r,$$

M étant la masse en eau du calorimètre, $155^{gr},336$.

Le disque, après avoir tourné cinq minutes entre les pôles de l'électro-aimant de Foucault, est plongé dans le calorimètre à $6^h 39^m$; la température du liquide calorimétrique s'élève, et à $6^h 40^m$ cette température, stationnaire depuis quelques secondes déjà, est $22^o,760$. On suit le thermomètre pendant encore cinq minutes, et les nombres inscrits plus haut conduisent, pour cette deuxième phase de l'expérience, à l'équation

$$0,105 = A.5.0,707 + \frac{5}{M+\mu} r,$$

μ étant la masse en eau du disque, $27^{gr},635$. De cette équation et de la précédente, on tire

$$A = 0,0164,$$
$$r = 1,724.$$

Or la chaleur perdue par le calorimètre pendant le temps nécessaire à l'établissement de l'équilibre de température, c'est-à-dire sensiblement de $6^h 39^m$ à $6^h 40^m$, est

$$(M+\mu)\left(A.0,100 + \frac{r}{M+\mu}\right),$$

car 0,100 est l'excès moyen pendant ce temps.

Si l'on remplace A et r par les valeurs obtenues plus haut, on trouve, pour le refroidissement total pendant cette minute, 0,0111. Telle est la quantité dont il faut corriger la température stationnaire observée $22^o,760$ pour tenir compte du refroidissement.

Reste encore à faire une petite correction provenant de ce que la température initiale du disque est $21^o,450$, tandis que la température initiale de l'eau est $21^o,440$. Il faut donc retrancher de l'échauffement trouvé l'échauffement dû au faible excès que possédait le disque: cet échauffement ε peut se calculer facilement par la formule

$$(M + \mu)\varepsilon = 0,01 \cdot \alpha,$$

d'où

$$\varepsilon = 0^\circ,0015.$$

La correction totale est donc

$$0^\circ,0111 - 0^\circ,0015 = 0^\circ,0096.$$

La température stationnaire observée 22°,760 doit donc être évaluée à 22°,770, ce qui donne, pour l'échauffement du calorimètre,

$$22^\circ,770 - 21^\circ,440 = 1^\circ,330.$$

En opérant ainsi, on a obtenu les échauffements suivants, déterminés chacun par plusieurs expériences bien concordantes.

Nombre de tours de la manivelle en une minute.	Nombre de tours du disque en une minute.	Durée de l'expérience.	Échauffement de l'eau du calorimètre.	Échauffement correspondant du disque.
4	611,2	15^m	0°,440	2°,913
		30	0,610	4,038
8	1222,4	7,5	0,880	5,826
		15	1,220	8,077
12	1833,6	5	1,330	8,805
		10	1,845	12,214
		15	2,040	13,505
26	3972,8	4	4,065	26,911
		8	4,600	30,452
31	4736,8	2	3,490	23,104

Les échauffements correspondant aux petites vitesses étant assez faibles, j'ai essayé, pour plus de certitude, de les déterminer par une autre méthode : j'ai substitué à l'eau du calorimètre de l'essence de térébenthine, dont la chaleur spécifique, beaucoup moindre, me permettait d'espérer des variations de température plus considérables. Avec 150 centimètres cubes (c'est-à-dire 130^gr,35) d'essence de térébenthine dans le calorimètre, l'immersion du disque, échauffé par une rotation de quinze minutes, avec la vitesse de 4 tours à la minute, a donné, dans trois expériences, les échauffements

$$1^\circ{,}167, \quad 1^\circ{,}171, \quad 1^\circ{,}166.$$

Or la chaleur spécifique de l'essence de térébenthine, à 20 degrés, est 0,43376; on avait donc dans le calorimètre l'équivalent de $56^{\text{gr}},541$ d'eau. Les échauffements précédents, rapportés à 150 grammes d'eau dans le calorimètre, seraient, par conséquent,

$$0^\circ{,}439, \quad 0^\circ{,}441, \quad 0^\circ{,}439,$$

Moyenne $0^\circ{,}440$.

ce qui est précisément le nombre trouvé avec l'eau. Cependant, on n'a pas poussé plus loin ces expériences; la viscosité du liquide retarde en effet beaucoup l'établissement de la température stationnaire et amène des erreurs qui sont bien manifestes, même avec de faibles échauffements. Les trois nombres cités plus haut: 1,167, 1,171 et 1,166, ne sont pas, en effet, très-concordants, et l'exactitude de ces nouvelles mesures était sensiblement moindre que celle des expériences que l'on voulait vérifier.

Les échauffements consignés au tableau précédent ne donnent évidemment pas la mesure exacte de la chaleur développée dans le disque pendant chaque expérience. Il est clair, en effet, que le disque se refroidit pendant toute l'expérience par suite de son contact avec l'air qui se renouvelle sans cesse autour de lui. C'est ce qu'indiquent nettement, sur le tableau précédent, les nombres qui se rapportent à une même vitesse de rotation et à des durées différentes de l'expérience. En prolongeant l'expérience pendant un temps double, par exemple, on n'obtient pas un échauffement double. Mais la comparaison de ces nombres permet de déterminer le refroidissement. L'échauffement du disque n'étant jamais très-considérable, comme on le voit par les nombres inscrits dans la dernière colonne du tableau, on peut admettre la loi de Newton et supposer, par conséquent, qu'à chaque instant le refroidissement est proportionnel à l'excès de la température du disque sur la température ambiante. Mais le coefficient de proportionnalité, qui sera le même pour toutes les expériences d'une même série, c'est-à-dire correspondant à une même vitesse de rotation, change évidemment d'une série à l'autre. L'expérience prouve que ce coefficient est lui-même proportionnel à la vitesse de rotation. Si, en effet, on fait le calcul dans cette double hypothèse, on trouve, pour le coefficient ainsi calculé, un nombre parfaitement constant, ce qui légitime complétement la manière dont on a cherché à évaluer le refroidissement.

Prenons, comme exemple du calcul, les deux expériences relatives à une vitesse de 8 tours de la manivelle. Les données directement fournies par l'expérience sont :

Nombre de tours de la manivelle.	Durée de l'experience.	Échauffement de l'eau du calorimètre.
8	$7^m,5$	$0^o,880$
	$15^m,0$	$1^o,220$

La vitesse de rotation du disque, étant proportionnelle au nombre de tours de la manivelle, peut être représentée par 8; de plus, la température initiale du disque étant la même que celle du liquide dans lequel on le plonge à la fin de l'expérience, l'échauffement du disque est proportionnel à l'échauffement de l'eau du calorimètre, et peut, par conséquent, être représenté par 0,880, dans la première expérience, et par 1,220, dans la seconde.

Donc, en appelant x l'échauffement qu'on eût observé dans la première expérience, s'il n'y avait pas eu refroidissement, et en remarquant que l'excès moyen, pendant les $7^m,5$ qu'a duré la première expérience, est $\frac{0,880}{2}$, on a pour cette première expérience

$$x = 0,880 + m \times 8 \times 7,5 \times \frac{0,880}{2},$$

m étant ce que nous nommerons le *coefficient de refroidissement*.

La deuxième expérience peut se partager en deux périodes, chacune de $7^m,5$, pendant lesquelles les excès moyens ont été respectivement $\frac{0,880}{2}$ et $\frac{0,880+1,220}{2}$. On a donc pour l'échauffement $2x$, qu'eût dû fournir cette deuxième expérience,

$$2x = 1,220 + m \times 8 \times 7,5 \times \frac{0,880}{2} + m \times 8 \times 7,5 \times \frac{0,880+1,220}{2};$$

m et x sont donc déterminés par les deux équations

$$x = 0,880 + m \times 8 \times 7,5 \times \frac{0,880}{2},$$

$$2x = 1,220 + m \times 8 \times 7,5 \times \frac{0,880}{2} + m \times 8 \times 7,5 \times \frac{0,880+1,220}{2},$$

qui donnent

$$x = 1,269$$

et

$$m = 0,01475.$$

C'est ainsi qu'a été dressé le tableau suivant :

Nombre de tours de la manivelle en une minute.	Nombre de tours de l'axe en une minute.	Durée de l'expérience.	Échauffement calculé x.	Coefficient de refroidissement m.
		m	o	
4	611,2	15,0	0,635	0,01475
8	1222,4	7,5	1,269	0,01475
12	1833,6	5,0	1,916	{ 0,01472 0,01477
26	3972,8	4,0	7,185	0,01476
31	4736,8	2,0	5,086	

le dernier nombre de la quatrième colonne étant calculé à l'aide du coefficient moyen 0,01475.

Si l'on rapporte ces échauffements à un même laps de temps, quinze minutes, on a les nombres :

Nombre de tours de la manivelle en une minute n.	Nombre de tours de l'axe en une minute.	Échauffement pour quinze minutes d'expérience θ.	$\frac{n^2}{\theta}$.
4	611,2	$0^\circ,635$	25,197
8	1222,4	2,538	25,208
12	1833,6	5,748	25,052
26	3972,8	26,944	25,089
31	4736,8	38,145	25,194
	Moyenne....	....	25,152

En l'on voit que ces échauffements sont proportionnels aux carrés des vitesses de rotation.

Ce résultat est intéressant indépendamment de la recherche qui nous occupe. Il nous montre en effet que la loi de Joule sur l'échauffement des corps conducteurs par l'électricité, loi établie pour des conducteurs linéaires et en repos, est encore vraie lorsque les conducteurs ont une forme quelconque, et même lorsqu'ils sont en mouvement. La loi de Joule veut en effet que l'échauffement soit proportionnel au carré de l'intensité du courant, mais, comme nous l'avons déjà rappelé, l'intensité des courants développés par induction dans un conducteur en mouvement est proportionnelle à la vitesse de déplacement de ce conducteur. L'échauffement doit donc être, dans le cas actuel, proportionnel au carré de la vitesse de rotation du disque. Ainsi se trouve vérifiée la loi de Joule dans des conditions bien différentes de celles où le savant physicien de Manchester s'était placé pour l'établir. Cette généralisation de la loi de Joule me semble particulièrement importante au point de vue de la théorie mécanique de la chaleur, puisque, dans cette théorie, ainsi que je l'ai montré ailleurs, la loi de Joule, *prise dans toute sa généralité*, est la base de tous les raisonnements relatifs aux applications de la théorie nouvelle à l'électricité (phénomènes d'induction, machines électro-magnétiques, etc.).

Revenant aux mesures qui font plus spécialement l'objet de ces recherches, servons-nous de la valeur moyenne 25,152 du quotient $\frac{n^2}{\theta}$ pour calculer l'échauffement correspondant à 4 tours de la manivelle par minute, puisque nous avons déjà calculé spécialement le travail pour cette valeur particulière de la vitesse.

La valeur de θ, déduite de cette moyenne pour la vitesse considérée, est $0^\circ,636$. Quant à la masse en eau de tout l'appareil, elle se compose des masses suivantes :

			gr	
CALORIMÈTRE.	Eau		150,000	155gr,336
	Laiton (1)	Calorimètre pesant 42gr,500	3,991	
		Support du disque p. 1gr,701	0,159	
		Agitateur pesant 9gr,710 ...	0,912	
	Mercure (2) du thermomètre		0,184	
	Verre (3) du thermomètre		0,090	
Disque en cuivre (4), pesant 291gr,202				27gr,635
				182gr,971

Le nombre d'unités de chaleur développées dans le disque, est donc $0,636 \times 0,182971 = 0^u,116369$.

Si l'on rapproche ce nombre du travail correspondant $50^{kgm},640$, on a pour l'équivalent mécanique de la chaleur

$$\frac{50,640}{0,116369} = 435,2.$$

III. — *Influence insensible des masses polaires de l'électro-aimant.*

C'est encore avec le disque de cuivre qu'ont été faites les expériences par lesquelles on a cherché à reconnaître

---

(1) Chaleur spécifique du laiton, 0,0939.
(2) » du mercure, 0,0333.
(3) » du verre, 0,1770.
(4) » du cuivre, 0,0949.

si le mouvement du disque développait des courants d'induction dans les masses polaires de l'électro-aimant : je les rapporterai donc ici.

On a fait tourner le disque, soit dans les conditions ordinaires, soit en présence de masses métalliques additionnelles, et l'on a mesuré, pour une même vitesse de rotation, le travail dépensé et la chaleur dégagée dans chaque cas. Les masses métalliques additionnelles que l'on a employées tour à tour étaient : 1° une masse de plomb pesant 900 grammes : dans cette masse était pratiquée une échancrure ayant pour profondeur le rayon du disque de cuivre, et recevant, par conséquent, une portion notable du disque, car la hauteur de la masse n'était guère moindre que le rayon du disque ; 2° deux masses de plomb pesant chacune 900 grammes : ces deux masses pouvaient être placées, l'une d'un côté du disque, l'autre de l'autre côté, et cachaient presque complétement la moitié du disque non comprise entre les surfaces de l'électro-aimant ; 3° une masse de cuivre, du poids de 560 grammes : cette masse, en forme de fer à cheval, embrassait aussi étroitement le disque. Un courant d'intensité constante animait l'électro-aimant.

Le déroulement d'une même longueur de fil sous une charge de 50 grammes a demandé les temps suivants :

Rien.	Une masse de plomb.	Deux masses de plomb.	Masse de cuivre.
$121^s,8$	$122^s,2$	$121^s,6$	$121^s,6$

Moyenne........ $121^s,8$

La vitesse n'est donc pas sensiblement altérée par la présence des masses additionnelles ; il en est, par suite, de même du travail.

La même égalité s'observe pour les quantités de chaleur dégagées dans les diverses conditions : voici, en effet, les nombres obtenus avec une vitesse de 12 tours de la manivelle à la minute, cette vitesse étant maintenue pendant cinq ou dix minutes :

	Rien.	Une masse de plomb.	Deux masses de plomb.	Masse de cuivre.
5 minutes	$1^\circ,655$	$1^\circ,655$	$1^\circ,655$	$1^\circ,650$
»	1,660	1,660	1,660	1,650
»	1,660	1,655	1,660	»
Moyennes.	1,658	1,657	1,658	1,650
10 minutes	2,265	2,265	2,265	»
»	2,265	2,275	2,265	»
Moyennes.	2,265	2,270	2,265	»

L'effet des masses additionnelles est donc insensible, et comme ces masses sont placées de façon à avoir une action tout à fait comparable à celle des masses polaires, on doit conclure que ces masses polaires ne sont elles-mêmes le siége d'aucun phénomène perturbateur.

EXPÉRIENCES AVEC L'ÉTAIN.

On a fait une deuxième série d'expériences en substituant au disque de cuivre un disque d'étain de dimensions à peu près égales; ce disque pesait $229^{gr},688$. Le travail qu'il fallait dépenser pour entretenir une vitesse de rotation uniforme, a été évalué exactement comme avec le cuivre. Dans le tableau suivant on a mis en regard les charges utiles et les temps employés par la longueur $1^m,4845$ de fil pour se dérouler sous ces diverses charges :

Charges	$11^{gr},30$	$41^{gr},10$	$90^{gr},5$
Durées	$32^s,0$	$8^s,8$	$4^s,0$

Le produit de la charge par la durée de la chute est encore un nombre constant :

361,60   361,68   362,0
Moyenne... 361,76.

Sous la charge utile $90^{gr},5$, la longueur $1^m,4845$ met, d'après cette moyenne, $3^s,997$ à se dérouler, ce qui correspond à une vitesse de l'axe de 861 tours à la minute; et le travail utile pendant quinze minutes est

$$0,0905 \times 1,4845 \times \frac{60}{3,997} \times 15 = 30^{\text{kgm}},251.$$

D'après cela, le travail nécessaire pour maintenir pendant quinze minutes une vitesse de rotation de $1833^{\text{t}},6$ à la minute (ce qui correspond à une vitesse de 12 tours de la manivelle dans le même temps) est

$$137^{\text{kgm}},164.$$

L'évaluation de la chaleur dégagée a été faite pour les vitesses de 12 et 27 tours de la manivelle par minute, et a donné :

Nombre de tours de la manivelle en une minute.	Nombre de tours du disque en une minute.	Durée de l'expérience.	Échauffement de l'eau du calorimètre.
12^{t}	$1833^{\text{t}},6$	5^{m}	$0^{\circ},430$
		10	0,595
27	4125,6	3	1,185

Des deux expériences relatives à la vitesse de 12 tours par minute, on déduit immédiatement

$$m = 0,01485$$

et

$$x = 0,622,$$

m désignant, comme précédemment, le coefficient de refroidissement, et x l'échauffement qu'on eût observé s'il n'y avait pas eu de pertes par l'air.

Admettant la même valeur du coefficient de refroidissement dans l'expérience correspondant à 27 tours par minute, on a pour cette expérience

$$x = 1,898.$$

Et si l'on rapporte tous les échauffements au même laps de temps, quinze minutes, on a :

Nombre de tours de la manivelle en une minute n.	Nombre de tours de l'axe en une minute.	Échauffement pour quinze minutes d'expérience θ.	$\frac{n^2}{\theta}$.
12	1833,6	1,866	77,170
27	4125,6	9,490	76,818
		Moyenne.	76,989

Les échauffements sont bien proportionnels aux carrés des vitesses de rotation, et le coefficient moyen de proportionnalité nous servira encore à calculer l'échauffement relatif à la vitesse de 12 tours à la minute : on trouve ainsi $1^{\circ},8704$.

Mais la masse en eau du calorimètre est toujours.	$155^{gr},336$
D'autre part, la masse en eau du disque est.	$12^{gr},915$ (1)
Total.	$168^{gr},251$

Le nombre d'unités de chaleur développées dans le disque est donc

$$1,8704 \times 0,168251 = 0,3147.$$

Il en résulte pour l'équivalent mécanique de la chaleur

$$\frac{137,164}{0,3147} = 435,8.$$

EXPÉRIENCES AVEC LE PLOMB.

On a également employé un disque de plomb de même grandeur que les précédents, et l'on a obtenu les résultats suivants :

1° *Mesure du travail.* — Les charges utiles et les temps employés par la longueur de fil $1^{m},4845$ pour se dérouler

(1) Chaleur spécifique de l'étain, 0,05623; poids du disque, $229^{gr},688$.

sous ces charges sont

Charges.........	$90^{g},1$	$41^{g},2$	$11^{g},35$
Durées....	$3^{s},3$	$7^{s},2$	$26^{s},2$

Le produit de la charge par la durée de la chute est, dans chaque cas,

$$297,33 \qquad 296,64 \qquad 297,37$$

Moyenne....... 297,11

Sous la charge utile $90^{gr},1$, la longueur $1^{m},4845$ met donc à se dérouler, d'après cette moyenne, $3^{s},298$, ce qui correspond à une vitesse de l'axe de $1043^{t},8$ à la minute, et le travail utile pendant quinze minutes est

$$0,091 \times 1,4845 \times \frac{60}{3,298} \times 15 = 36^{kgm},505.$$

Le travail nécessaire pour maintenir pendant quinze minutes la vitesse de rotation de $1833^{t},6$ de l'axe (ou 12 tours de la manivelle) en une minute, est donc

$$112^{kgm},655.$$

2° *Mesure de la chaleur.* — On a mesuré la chaleur produite avec cette vitesse de l'axe pendant cinq et dix minutes, et l'on a trouvé :

Nombre de tours de la manivelle en une minute.	Nombre de tours du disque en une minute.	Durée de l'expérience.	Échauffement de l'eau du calorimètre
12	$1833^{t},6$	5^{m}	$0^{o},350$
		10^{m}	$0^{o},475$

Il en résulte

$$m = 0,01579$$

et

$$x = 0,5158,$$

m désignant toujours le coefficient de refroidissement, et x l'échauffement que l'on observerait s'il n'y avait pas de refroidissement. On aurait donc, pour quinze minutes, un échauffement égal à 1,5474. La chaleur engendrée dans le disque pendant quinze minutes est donc $0^u,2575$, la masse totale $M + \mu$ étant $0,155336 + 0,011083$ (1).

Ces expériences donnent donc pour l'équivalent cherché

$$\frac{112,655}{0,2575} = 437,4.$$

EXPÉRIENCES AVEC L'ALUMINIUM.

Une dernière série d'expériences a été faite avec l'aluminium. Les propriétés physiques toutes spéciales de ce corps le désignaient naturellement à mes recherches, et j'ai observé, en effet, des élévations de température considérables avec ce métal, qui me semble plus que tout autre propre à montrer dans un cours, par une expérience saillante. l'échauffement énorme que l'on peut obtenir au moyen de l'appareil de Foucault.

Les mesures de travail faites d'après la méthode indiquée plus haut ont donné les résultats consignés dans le tableau suivant, où l'on a rapporté les charges utiles et les temps employés par la longueur de fil $1^m,4845$ pour se dérouler sous ces charges :

Charges........	$11^{gr},8$	$41^{gr},35$	$91^{gr},25$	$190^{gr},90$
Durées...... ..	$71^s,8$	$20^s,5$	$9^s,3$	$4^s,45$

Le produit de la charge par la durée est un nombre constant

847,24 847,68 848,62 847,70

Moyenne 847,81

Nous retrouvons donc cette loi : le travail nécessaire pour entretenir une certaine vitesse pendant un temps donné est proportionnel au carré de cette vitesse.

Sous la charge utile $91^{gr},25$, la longueur de fil $1^m,4845$ met à se dérouler, d'après cette moyenne, $9^s,29$, avec une

(1) Chaleur spécifique du plomb, 0,0314; poids du disque, $352^{gr},970$.

vitesse de $370^t,45$ de l'axe en une minute, et le travail utile pendant quinze minutes sera pour cette vitesse de rotation

$$0,0925 \times 1,4845 \times \frac{60}{9,29} \times 15 = 13^{kgm},0915.$$

Le travail utile pour la vitesse de $1833^t,6$ de l'axe (ou 12 tours de la manivelle) en une minute sera donc

$$13,0915 \times \frac{\overline{1833,6}^2}{\overline{370,45}^2} = 321^{kgm},46.$$

Les mesures de chaleur ont porté sur les échauffements correspondant aux vitesses de 12 tours et 24 tours à la minute :

Nombre de tours de la manivelle en une minute.	Nombre de tours du disque en une minute.	Durée de l'expérience.	Échauffement de l'eau du calorimètre.
12^t	$1833^t,6$	5^m	$0^o,985$
		10	1,370
24	3667,2	2	1,675
		4	2,475

De ces deux séries d'expériences on déduit :

Nombre de tours de la manivelle en une minute.	Nombre de tours de l'axe en une minute	Durée de l'expérience	Échauffement calculé x.	Coefficient de refroidissement m.
12^t	$1833^t,6$	5^m	$1^o,416$	0,01460
24	3667,2	2	2,267	0,01473

Et en rapportant tous les échauffements à une même durée de l'expérience, quinze minutes, on a :

Nombre de tours de la manivelle en une minute n.	Nombre de tours de l'axe en une minute	Échauffement pour 15 minutes d'expérience θ.	$\frac{n'}{\theta}$.
12^t	$1833^t,6$	$4^o,248$	33,898
24	3667,2	17,004	33,874
	Moyenne.		33,886

L'échauffement relatif à la première série est, d'après cette moyenne, 4°,2495, et la quantité de chaleur correspondante développée dans le disque est

$$(0,155336 + 0,018604)\ (^1) \times 4,295 = 0,73915.$$

L'équivalent mécanique de la chaleur déduit de ces expériences est donc

$$\frac{321,46}{0,73915} = 434,9.$$

CONCLUSIONS.

Ces diverses expériences conduisent aux valeurs suivantes de l'équivalent mécanique de la chaleur :

Expériences avec	le cuivre.........	435,2
»	l'étain............	435,8
»	le plomb........	437,4
»	l'aluminium......	434,9

L'accord de ces résultats ne saurait laisser aucun doute sur la nécessité d'adopter pour l'équivalent mécanique de la chaleur un nombre un peu plus élevé que le nombre généralement admis. Toutefois, les résultats inscrits dans le tableau précédent n'ont pas tous la même valeur. Les expériences relatives au cuivre sont les plus nombreuses et les plus étendues, et elles présentent entre elles une grande concordance; nous les préférons donc aux expériences peu nombreuses faites avec l'étain et avec le plomb, expériences qui, d'ailleurs, n'ont été entreprises que dans le dessein de vérifier les premières. La concordance des expériences effectuées avec le cuivre tient sans doute à la parfaite homogénéité de ce métal, tandis qu'il serait bien difficile d'obtenir la même homogénéité dans un disque d'étain ou dans un disque de plomb. Ce dernier, quoique soigneusement

(1) Chaleur spécifique de l'aluminium, 0,2181; poids du disque, 85gr,302.

verni à sa surface comme tous les autres, a en outre éprouvé un refroidissement sensiblement supérieur à celui qu'avaient manifesté les métaux précédemment employés. Le plomb, en effet, se distingue par un pouvoir émissif considérable.

Pour ces raisons, les expériences sur le plomb et même jusqu'à un certain point les expériences sur l'étain ne nous paraissent pas mériter la même confiance que les expériences sur le cuivre. On trouve, au contraire, dans l'aluminium les mêmes garanties que dans le cuivre, et, sous quelques rapports, une supériorité que nous avons signalée plus haut. Je mettrai donc le résultat relatif à l'aluminium sur le même rang que le résultat relatif au cuivre, et je prendrai pour valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur

$$435.$$

Vu et approuvé :

Le 19 juillet 1870.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

MILNE EDWARDS.

Vu et permis d'imprimer :

Le 19 juillet 1870.

Le Vice-Recteur de l'Académie de Paris,

A. MOURIER.

SECONDE THÈSE.

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Travaux de M. Pasteur sur les fermentations.

Vu et approuvé :

Le 19 juillet 1870.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

MILNE EDWARDS.

Vu et permis d'imprimer :

Le 19 juillet 1870.

Le Vice-Recteur de l'Académie de Paris,

A. MOURIER.

PARIS. — IMPRIMERIE DE GAUTHIER-VILLARS,
Rue de Seine-Saint-Germain, 10, près l'Institut.