

ANNALES SCIENTIFIQUES DE L'É.N.S.

CH RIVIÈRE

Essai sur le pouvoir refroidissant des gaz

Annales scientifiques de l'É.N.S. 3^e série, tome 1 (1884), p. 283-328

http://www.numdam.org/item?id=ASENS_1884_3_1__283_0

© Gauthier-Villars (Éditions scientifiques et médicales Elsevier), 1884, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Annales scientifiques de l'É.N.S. » (<http://www.elsevier.com/locate/ansens>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

ESSAI
SUR LE
POUVOIR REFROIDISSANT DES GAZ,

PAR M. CH. RIVIÈRE,
PROFESSEUR DE PHYSIQUE AU LYCÉE SAINT-LOUIS.

INTRODUCTION.

Un corps chaud, plongé dans une atmosphère limitée par une enceinte froide, perd de la chaleur. Les méthodes expérimentales qu'on peut employer pour évaluer cette perte sont de deux sortes :

Ou bien le corps, abandonné à lui-même, se refroidit, et, de la vitesse de son refroidissement, on déduit la quantité de chaleur qu'il perd à chaque instant; les conditions concernant l'enceinte, le milieu ambiant et la surface du corps étant déterminées, la chaleur spécifique de ce dernier étant connue, l'expérience consiste seulement dans l'observation, à des intervalles de temps aussi rapprochés que possible, de la température du corps;

Ou bien on maintient le corps à une température constante, et l'observateur doit alors déterminer, dans chaque expérience : 1° cette température; 2° la quantité de chaleur que perd le corps ou qu'on est obligé de lui fournir pour le maintenir dans son état stationnaire.

Il n'est pas évident que ces deux sortes de méthodes doivent toujours conduire au même résultat, c'est-à-dire donner, pour une même température du corps et toutes choses étant égales d'ailleurs, une même quantité de chaleur perdue dans un même intervalle de temps très petit. Le milieu ambiant, en effet, prend, sous l'influence du corps

chaud, un certain état de température qui est variable dans la première méthode, stationnaire dans la seconde; l'état stationnaire exigeant nécessairement un certain temps pour s'établir, la distribution des températures du milieu ambiant ne sera jamais, pour une même température du corps, la même dans les deux cas, et sera toujours, dans le premier, en retard sur ce qu'elle serait dans le second : or, on ne saurait nier que cette distribution ait une influence sur le refroidissement.

Dans la seconde méthode, les conditions sont donc mieux définies que dans la première. Si toutefois le refroidissement observé est très lent, la différence qui vient d'être signalée devra être insignifiante, et la vitesse du refroidissement à une température déterminée pourra, sans erreur sensible, servir de mesure à la quantité de chaleur qui serait perdue, à la même température, dans un état stationnaire.

Cette vitesse du refroidissement a d'abord été considérée comme proportionnelle à l'excès de la température du corps sur la température de l'enceinte : c'est là la loi de Newton, ou loi de Richmann; elle a servi de base aux travaux de Leslie. On l'applique encore pour faire les corrections des expériences calorimétriques, car elle se vérifie pour des excès de température très petits.

Dès 1740, Martine avait prouvé son inexactitude pour des températures élevées. D'autres observateurs, Erxleben, Dalton, Delaroché firent des remarques analogues; mais, pour trouver une étude détaillée du phénomène, il faut arriver jusqu'au travail classique de Dulong et Petit (¹).

La chaleur perdue par un corps exposé au refroidissement doit être décomposée en *chaleur rayonnée* et *chaleur enlevée au contact* par l'air ambiant.

L'étude de ces deux modes de déperdition constitue deux problèmes absolument distincts, mais cependant presque toujours liés au point de vue expérimental.

Dulong et Petit, les premiers, analysent le phénomène et donnent une formule pour le rayonnement et une autre pour le pouvoir refroidissant des gaz.

(¹) DULONG et PETIT, *Annales de Chimie et de Physique*, 2^e série, t. VII.

Ils opèrent en observant le refroidissement d'un thermomètre de 2^{cm} à 6^{cm} de diamètre placé au milieu d'une enceinte sphérique de 30^{cm}; la température la plus élevée du thermomètre est environ 250°, celle de l'enceinte 80°; la pression du gaz varie de 720^{mm} à 45^{mm}. Dans ces conditions, la quantité de chaleur enlevée par le gaz à la pression p , quand le corps a sur l'enceinte un excès de température t , est représentée par l'expression

$$np^b t^c.$$

Pour un corps de dimensions déterminées, n ne dépend que de la nature du gaz; c en est indépendant et garde la valeur 1,233; b dépend de la nature du gaz, et, par suite, les pouvoirs refroidissants relatifs des différents gaz varient avec la pression, mais varient peu, parce que les différentes valeurs de b sont voisines (0,45 pour l'air, 0,38 pour l'hydrogène, 0,517 pour l'acide carbonique). Sous la pression 760^{mm}, ces pouvoirs refroidissants relatifs sont :

Air.....	1
Hydrogène.....	3,45
Acide carbonique.....	0,965

En 1846, MM. de la Provostaye et P. Desains (1) soumettent à une revision minutieuse le travail de Dulong et Petit. Ces derniers avaient fait toutes leurs recherches avec la même enceinte de 30^{cm} de diamètre. MM. de la Provostaye et Desains opèrent tantôt avec une sphère de 24^{cm} ou de 15^{cm}, tantôt avec un cylindre de 6^{cm} sur 20^{cm}, et la loi du refroidissement n'est plus la même dans ces différentes enceintes. Aux pressions élevées seulement, on la retrouve toujours telle que l'avaient énoncée Dulong et Petit; mais, à partir d'une certaine valeur de la pression, le refroidissement s'en montre indépendant, et cela dans des limites qui dépendent de l'enceinte (6^{mm} et 2^{mm}, 8 pour la sphère de 24^{cm}, 70^{mm} et 15^{mm} pour le cylindre). Dans une expérience faite avec l'acide carbonique, le refroidissement a même augmenté, la pression diminuant.

De récentes observations de M. Witz (2), effectuées à des pressions

(1) DE LA PROVOSTAYE et P. DESAINS, *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, t. XVI.

(2) WITZ, *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXXXIX.

supérieures à la pression atmosphérique, ont montré que, dans cette direction encore, on rencontrait, vers la pression 1200^{mm}, une limite à la loi de Dulong et Petit, tout en restant à peu près dans les mêmes conditions expérimentales que ces physiciens.

M. Crookes (¹), dans le cours de ses recherches sur les propriétés des gaz très raréfiés, s'est occupé aussi de leur pouvoir refroidissant. Une boule de verre renfermant un petit thermomètre est plongée brusquement dans l'eau à 50°; on observe, non plus le refroidissement, mais le réchauffement du corps, comme l'avaient déjà fait MM. de la Provostaye et P. Desains dans quelques-unes de leurs expériences. Les résultats obtenus par M. Crookes montrent que, à des pressions de quelques millièmes de millimètre seulement, l'air possède encore un pouvoir refroidissant considérable.

En 1872, MM. Jamin et Richard (²) publièrent les résultats d'un travail dans lequel il est fait usage d'une méthode toute différente des précédentes. Le corps soumis à l'expérience est un fil de platine placé au milieu d'un grand ballon de verre, échauffé par un courant électrique et observé dans son état stationnaire. Le gaz renfermé dans le ballon prend, sous l'influence de cet échauffement, un excès de température qui se traduit par une augmentation de pression. Des expériences préliminaires permettent de déduire de cette augmentation de pression la quantité de chaleur que le gaz cède à l'enceinte ou qu'il reçoit du fil; la température de ce dernier se déduit de sa résistance électrique. Cette méthode a le grand avantage d'éliminer la chaleur rayonnée. La pression du gaz a varié, dans ces expériences, de 815^{mm} à 74^{mm}; l'excès de température du fil n'est pas indiqué par les auteurs; mais, en le supposant proportionnel à l'augmentation de résistance, ce qui, pour le platine, ne s'éloigne pas beaucoup de la vérité, on retrouve la formule $np^b t^c$ de Dulong et Petit, dans laquelle les coefficients n , b , c ont les valeurs suivantes :

	Acide carbonique.	Air.	Hydrogène.
n	0,922	2,57	26,7
b	0,37	0,44	0,42
c	1,17	1,28	1,30

(¹) CROOKES, *Proc. Roy. Soc.*, t. XXXI; Londres, 1881.

(²) JAMIN et RICHARD, *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXXV.

Les expériences qui viennent d'être rappelées ont été entreprises sans que leurs auteurs aient cherché à analyser le mécanisme du refroidissement par les gaz, ni attribué de signification théorique particulière aux coefficients numériques qui traduisaient les résultats de leurs recherches. Or, pour qu'un gaz puisse refroidir un autre corps par son contact, il faut qu'il possède une sorte de conductibilité pour la chaleur analogue à celle des solides; mais les courants de convection, qui prennent si facilement naissance dans un fluide nécessairement soumis à l'action de la pesanteur, font qu'il est très difficile d'observer dans un gaz une propagation calorifique semblable à celle qui s'établit dans les corps solides.

L'idée d'une conductibilité propre des gaz se trouve énoncée pour la première fois par Péclet ⁽¹⁾, à l'occasion de ses recherches sur la conductibilité des substances filamenteuses. Magnus ⁽²⁾, dans un travail bien connu, a mis en évidence cette propriété pour l'hydrogène, sans affirmer qu'elle existât chez les autres gaz. Depuis, la théorie cinétique des gaz, développée principalement par Clausius et par Maxwell, a suscité une foule de recherches destinées à la vérifier, et ces recherches ont porté en particulier sur la propagation calorifique, sur la détermination du pouvoir conducteur absolu des gaz et sur ses relations avec le coefficient de frottement. Dans ces recherches, dues principalement à des physiciens allemands, Narr (1871) ⁽³⁾, Stéfan (1872) ⁽⁴⁾, Winkelmann (1875-1876) ⁽⁵⁾, Kundt et Warburg (1875) ⁽⁶⁾, la méthode consiste toujours dans l'observation du refroidissement d'un thermomètre placé au centre d'une enceinte à température constante : c'est tantôt un thermomètre ordinaire à mercure, comme dans les expériences de Kundt et Warburg, tantôt un thermomètre à air constitué par une enceinte concentrique à la première, comme dans les recherches de Winkelmann.

Mais la grande difficulté est toujours l'élimination des courants de

(1) PÉCLET, *Traité de la chaleur*.

(2) MAGNUS, *Pogg. Ann.*, t. CXII.

(3) NARR, *Pogg. Ann.*, t. CXLII.

(4) STÉFAN, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Vienne*; 1872.

(5) WINKELMANN, *Pogg. Ann.*, t. CLVI, CLVII et CLIX.

(6) KUNDT ET WARBURG, *Pogg. Ann.*, t. CLVI.

convection. On cherche à s'en garantir en réduisant la distance qui sépare le thermomètre de l'enceinte, et, dans ces conditions, les observateurs retrouvent toujours, entre certaines limites de pression, la constance du pouvoir refroidissant des gaz observée par MM. de la Provostaye et Desains. Comme la théorie cinétique conduit à un coefficient de conductibilité indépendant de la pression, on conclut généralement qu'un refroidissement indépendant de la pression est dû à la conductibilité seule. Cette conclusion est, il est vrai, étayée le plus souvent de considérations mécaniques qu'on trouvera développées en particulier dans les Mémoires de M. Lorentz ⁽¹⁾ et de M. Oberbeck ⁽²⁾. Mais, pour d'autres physiciens, la convection existe toujours : on trouvera, par exemple, dans un Mémoire de M. Stoney ⁽³⁾, un commentaire ingénieux des expériences de MM. de la Provostaye et Desains, dans lequel l'auteur suppose l'existence simultanée d'une convection et d'un mode particulier de propagation auquel il donne le nom de *pénétration*.

Le but du présent travail n'a pas été de chercher à décider sur cette question délicate, en répétant des expériences semblables à celles de tant de physiciens éminents; on a voulu, au contraire, se placer dans des conditions toutes différentes, espérant que l'expérience pourrait fournir encore des résultats de quelque intérêt, et faire l'essai d'une méthode qui permettrait d'étudier non seulement le pouvoir refroidissant des gaz, mais encore le rayonnement des corps solides à de hautes températures.

Cette méthode n'est pas entièrement nouvelle : elle est analogue à celle de MM. Jamin et Richard, et n'en diffère guère que par la manière d'évaluer les quantités de chaleur. C'est, en effet, l'observation d'un fil de platine échauffé par un courant électrique qui permet d'opérer dans les limites les plus étendues de température et de pression, et ce sont précisément ces limites qu'on a voulu reculer au delà de celles qui ont été généralement gardées jusqu'ici.

(1) Voir *Beiblätter*; 1880 et 1882.

(2) OBERBECK, *Wied. Ann.*, t. VII.

(3) STONEY, *Philos. Mag.*; 1877.

MÉTHODE.

Un fil métallique, traversé par un courant électrique, s'échauffe jusqu'à ce que la production de chaleur que détermine le courant soit exactement compensée par la perte qui provient du rayonnement et du contact avec l'air ambiant. La température stationnaire, toujours rapidement atteinte, qui caractérise cet état d'équilibre, est d'autant plus élevée que le courant a une intensité plus grande; on pourra donc, en graduant convenablement cette intensité, faire l'expérience à telle température qu'on voudra, depuis la température de l'enceinte jusqu'à des degrés voisins de la fusion du fil employé.

Il s'agit d'évaluer : 1° cette température; 2° la quantité de chaleur perdue, c'est-à-dire la quantité de chaleur développée par le passage de l'électricité.

La résistance qu'un corps conducteur oppose au passage de l'électricité dépend de sa température, et, s'il s'agit d'un fil métallique, cette résistance croît quand la température s'élève. Si l'on connaît exactement la relation qui existe entre ces deux quantités et si l'on peut déterminer la résistance du fil pendant qu'il est traversé par le courant destiné à le maintenir à une température stationnaire, on pourra en déduire cette température.

Quant à la quantité de chaleur dégagée pendant l'unité de temps par le passage de l'électricité, elle est proportionnelle, d'après la loi de Joule, à la résistance du fil et au carré de l'intensité du courant; il nous faudra donc, pour l'évaluer, mesurer encore cette intensité.

La variation de la résistance d'un fil métallique a été étudiée par un grand nombre de physiciens. Tant que la variation de la température reste comprise entre des limites restreintes, cette variation et celle de la résistance peuvent être regardées comme proportionnelles, et la résistance r d'un fil à la température t° peut être représentée, en fonction de la résistance r_0 à 0° , par l'expression

$$r_0(1 + \alpha t).$$

α est ce qu'on appelle le *coefficient de résistance*.

Les expériences faites sur ce sujet ont montré qu'au delà de certaines

limites de température il n'était plus permis de regarder la résistance comme représentée par une formule aussi simple, et l'on a donné des formules plus complexes. Mais on a trouvé aussi que le coefficient α n'était pas le même pour les différents métaux, et, pour le même métal, les différents observateurs ont donné des nombres différents; en effet, la présence des moindres impuretés, ou encore la trempe, le recuit, la traction, changent ce coefficient. Parmi les fils de platine du commerce que j'ai eus entre les mains, l'un me donnait $\alpha = 0,00378$, un autre $\alpha = 0,00318$.

Si donc on veut, de la résistance d'un fil, déduire sa température, il faudra avoir étudié préalablement ce fil même; encore devra-t-on, dans le cours des expériences, s'assurer que son coefficient n'a pas changé.

Pour étudier les variations de résistance d'un fil à des températures aussi élevées que celles que j'avais en vue, on ne pouvait employer, pour déterminer les températures, qu'un thermomètre à air, à réservoir de porcelaine. On connaît les difficultés rencontrées par tous les physiciens qui se sont occupés de ce genre de déterminations; il importait donc de réduire autant que possible le nombre des observations à faire avec un thermomètre de cette nature. Aussi n'ai-je étudié ainsi qu'un fil de platine; puis je me suis assuré que ce fil pouvait être de nouveau échauffé et refroidi sans que son coefficient de résistance changeât, et, comme je n'avais, après cela, qu'à mesurer sa résistance pour avoir sa température, c'est lui qui m'a servi désormais de thermomètre pour étudier les fils destinés aux expériences de refroidissement.

L'exposition de la méthode employée dans ces recherches sur le refroidissement comprend donc :

1° Description du thermomètre à air qui a servi aux mesures directes de température;

2° Étude spéciale, à l'aide de ce thermomètre, d'un fil de platine que j'appellerai *fil thermométrique*;

3° Comparaison des résistances, à diverses températures, du fil thermométrique et de fils divers;

4° Mesure de la résistance d'un fil traversé par un courant destiné à l'échauffer;

5° Mesure de l'intensité de ce courant

6° Disposition générale des appareils.

THERMOMÈTRE A AIR.

Ce thermomètre se compose essentiellement d'un réservoir cylindrique, relié par un tube de cuivre capillaire à un manomètre. Le mercure, dans la branche de ce manomètre qui communique avec

Fig. 1.

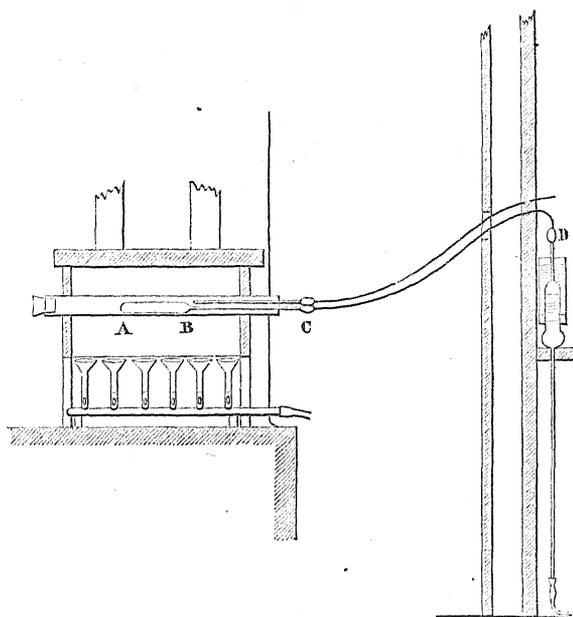
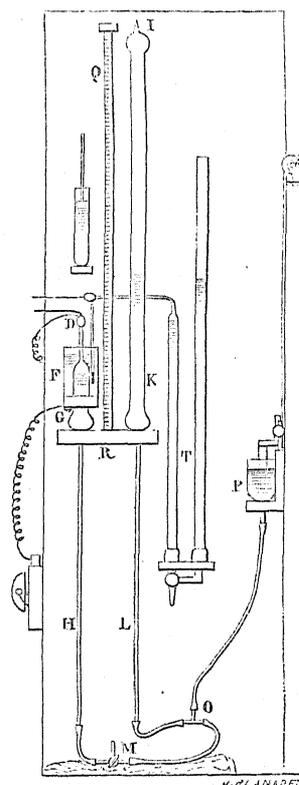


Fig. 2.



le réservoir, peut être ramené à un repère fixe. C'est un appareil à volume constant, à la dilatation près des enveloppes, et la température se déduit des variations de pression.

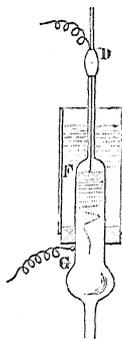
Le réservoir a été chauffé plusieurs fois au rouge vif dans un four à tube système Perrot avant d'être monté sur l'appareil; la dilatation

permanente (signalée par H. Sainte-Claire Deville) qu'éprouve la porcelaine neuve quand elle est fortement chauffée a donc fait son effet avant que le thermomètre ait servi à des mesures.

Le réservoir AB (voir les *fig.* 1 et 2) se prolonge par une tige BC, également en porcelaine, de 1^{mm} de diamètre intérieur. Cette tige est mastiquée en C à un tube de cuivre CD ayant à peu près le même diamètre, et une longueur d'un peu plus de 1^m; le masticage C, qui est exposé à la chaleur du four, est entouré d'un tube de plomb dans lequel circule, pendant l'expérience, un courant d'eau froide.

L'autre extrémité D du tube de cuivre est mastiquée sur la petite branche du manomètre. Cette petite branche se compose de deux parties : une partie large FG ayant 0^m,02 de diamètre intérieur, quelques centimètres de hauteur et entourée d'un manchon rempli d'eau; une partie plus étroite H, de 0^m,80 de longueur environ. Un fil de platine très fin, pris dans le masticage en D, se termine en F (*fig.* 3) et sert de repère d'affleurement; un autre fil est soudé en G dans la partie large.

Fig. 3.



La grande branche se compose aussi d'une partie large IK, de 1^m environ de hauteur et d'une partie étroite L; elle est fermée à sa partie supérieure.

Les deux branches communiquent par leur partie inférieure à l'aide d'un tube de caoutchouc épais. Sur le trajet de ce tube se trouvent un robinet à trois voies M et un raccord O conduisant à un réservoir de mercure P. Ce réservoir peut être élevé ou abaissé rapidement au

moyen d'un petit treuil ; pour faire varier plus lentement le niveau du mercure, on enfonce ou l'on retire un petit plongeur S fixé à une crémaillère.

Avant de fermer la grande branche, on y a fait le vide. Pour cela, on l'a isolée de la petite branche à l'aide du robinet M, et on l'a mise en relation, par sa partie supérieure, avec une trompe à mercure. Le réservoir P étant descendu aussi bas que possible, le mercure n'est monté d'abord que dans la partie L ; on a chauffé à l'aide d'un brûleur le tube IK, afin d'en chasser toute humidité, puis on a élevé peu à peu le réservoir P, tout en faisant marcher la trompe, jusqu'à ce que le mercure fût monté dans la partie I, qu'on a alors fermée à la lampe.

Avant de rétablir la communication entre les deux branches, on s'est servi du robinet à trois voies M pour faire et maintenir quelque temps le vide dans la petite branche et dans le réservoir de porcelaine, afin de les bien dessécher ; pendant cette opération, le réservoir était maintenu à une température rouge. Puis on a laissé rentrer de l'air sec sous une pression calculée d'avance approximativement, de telle sorte que la plus forte pression qu'on dût mesurer dans le cours des expériences fût à peu près égale à une atmosphère : vers 1200°, en effet, la porcelaine commence à perdre sa rigidité, et il est bon qu'à ces températures la pression soit à peu près la même à l'intérieur et à l'extérieur de l'appareil.

En tournant alors le robinet M, on mit les deux branches en communication, le réservoir P servant à régler le niveau du mercure dans la petite.

La hauteur des niveaux se lit sur un tube de verre vertical QR, divisé en demi-millimètres à l'aide d'une bonne machine à diviser. A cet effet, une lunette, mobile autour d'un axe vertical, est installée en face et à 1^m environ des tubes ; on pointe dans cette lunette le niveau qu'il s'agit de déterminer, puis, en la tournant légèrement, on amène l'échelle QR dans le champ ; le fil du réticule se projette alors sur les divisions, et, comme on peut, à l'œil, déterminer sa position à $\frac{1}{10}$ de division près, on lit la hauteur cherchée avec une approximation de $\frac{1}{20}$ de millimètre.

Pour faire affleurer le mercure exactement à l'extrémité F du fil de platine, on met ce fil en communication avec le pôle d'une pile par

l'intermédiaire d'une sonnerie électrique; le fil G communique avec l'autre pôle. On élève lentement le réservoir P jusqu'à ce que l'on entende la sonnerie, et alors on le fixe; mais le niveau du mercure a été nécessairement élevé un peu trop haut; on l'abaisse en sortant le plongeur, de telle sorte que la communication électrique soit rompue, puis, par un mouvement très lent de la crémaillère, on le relève jusqu'à ce que l'on entende de nouveau la sonnerie. Ce mode d'affleurement a paru excessivement délicat, et surtout très commode : il évite la fatigue qui résulte pour l'œil de la visée attentive d'un objet souvent mal éclairé; de plus, un trait de repère, tracé sur un tube de verre et regardé dans une lunette, ne peut être mis absolument au point en même temps que le sommet d'un ménisque qui se trouve parfois à 0^m,01 derrière lui; enfin, l'observateur n'est plus obligé d'avoir, en même temps, l'œil à la lunette et la main sur l'organe de l'appareil destiné à changer le niveau du mercure.

Ce manomètre est installé sur une planche verticale solidement fixée et séparée du four qui renferme le réservoir de porcelaine par plusieurs écrans en planches ou en clinquant.

Un bout de tube de même diamètre que les tubes manométriques, et rempli de mercure, renferme un thermomètre destiné à donner la température des colonnes de mercure qui, pour l'évaluation des pressions, sont toujours ramenées à 0°. Les lectures faites sur la règle divisée n'ont pas subi de corrections, les observations ayant été toutes faites entre 15° et 20°.

La température de la partie de l'espace nuisible comprise entre le repère d'affleurement et le tube de cuivre est donnée par un thermomètre placé dans le manchon qui entoure la petite branche.

La température du reste de l'espace nuisible jusqu'au réservoir se détermine à l'aide d'un compensateur. C'est une tige de porcelaine identique à la tige du réservoir, c'est-à-dire de même longueur et percée, comme elle, d'un canal de 1^{mm} de diamètre, mais fermée à l'une de ses extrémités; l'autre extrémité est reliée, par un tube de cuivre semblable au premier, à un manomètre ordinaire.

Ce compensateur constitue donc un petit thermomètre à air. Il est chargé, au début, d'air à la pression atmosphérique. Son manomètre est placé en T, à côté du premier, et observé avec la même lunette; on

y ramène aussi le niveau du mercure de la petite branche à un repère fixe tracé sur le verre, et, comme la grande branche est ouverte à l'air libre, on lit le baromètre à chaque observation pour pouvoir tenir compte de la pression atmosphérique. Les lectures de ce compensateur n'exigent d'ailleurs pas une très grande précision et sont faites beaucoup plus rapidement que celles du thermomètre principal.

Les volumes des différentes parties de l'appareil ont été déterminées, les uns par des jaugeages au mercure, les autres par des expériences manométriques. Ainsi, cinq expériences manométriques ont donné, pour le volume du réservoir à 18°, les valeurs

53095^{mmc}
 52642
 52806
 52821
 52868

La moyenne, qui n'est pas modifiée par l'admission des deux valeurs extrêmes, est 52 846^{mmc}; on a adopté 52 850^{mmc}.

On a trouvé de même, pour le volume BD à 18°,

1580^{mmc};

et un jaugeage au mercure a donné, pour DF,

1956^{mmc}.

ÉTUDE DU FIL THERMOMÉTRIQUE.

L'appareil qui sert à mesurer les résistances comprend : une grande caisse de résistances avec pont de Wheatstone, une clef à contacts successifs et un galvanomètre à réflexion.

Le fil qu'il s'agit d'étudier est enroulé sur le réservoir même du thermomètre. On ne pouvait songer, pour le relier à l'appareil de mesure, à faire arriver jusqu'à ce réservoir des conducteurs de cuivre ou de quelque autre corps dont on eût pu négliger la résistance : tout autre métal que le platine eût été fondu à la chaleur du four. Les deux bouts du fil étaient placés le long de la tige du thermomètre, et, en dehors

du four seulement, reliés à des fils de cuivre aboutissant à un commutateur. Ces deux bouts de fil, dont la température ne pouvait être déterminée, constituaient donc une sorte de résistance nuisible qu'il fallait éliminer. Pour cela, un morceau du même fil de platine était placé à côté des deux bouts du fil principal le long de la tige, et relié de la même manière au commutateur. Ce fil formait comme un compensateur analogue au compensateur du thermomètre; en retranchant sa résistance de celle du fil principal, on avait la résistance de la partie enroulée sur le réservoir, et dont la température était donnée par le thermomètre.

La *fig. 4* montre la disposition de ces fils sur la tige du thermomètre : A et B sont les deux bouts du fil principal, dont la majeure partie est enroulée sur le réservoir; C et D sont les deux bouts du fil compensateur qui s'arrête en E à la naissance du réservoir.

Fig. 4.



Pour faire une détermination, on donnait la quantité de gaz nécessaire, puis on attendait deux ou trois heures que la température fût stationnaire, c'est-à-dire ne changeât plus sensiblement en dix minutes, temps nécessaire pour faire une observation. On procédait alors aux déterminations des résistances et des pressions, et aux lectures des thermomètres destinés aux corrections; on répétait ces déterminations en les croisant, afin d'éliminer l'influence des variations lentes qui pouvaient encore se produire. La pression du gaz n'étant constante ou ne variant régulièrement qu'à certaines heures de la journée, on ne pouvait guère faire plus de deux ou trois observations par jour.

On fit ainsi deux séries d'observations. Pendant la première, un accident ayant empêché le compensateur du thermomètre de fonctionner, on a supposé que la moitié du volume de la tige était à la température du réservoir, et le reste à la température de la salle. La seconde série a été faite avec le compensateur. Les deux séries offrent d'ailleurs une concordance satisfaisante.

On a représenté les résultats par une courbe, en portant en abscisses

les températures et en ordonnées les rapports des résistances à la résistance à 0° . Ces déterminations ont permis de tracer cette courbe jusqu'à 1250° . Entre 0° et 100° , le coefficient moyen de résistance est égal à $0,00378$; il diminue à mesure que la température s'élève, mais de moins en moins rapidement : entre 800° et 1200° il semble absolument constant et égal à $0,00272$.

ÉTUDE DES FILS DESTINÉS AUX EXPÉRIENCES SUR LE REFROIDISSEMENT.

Le fil qu'on veut étudier est chauffé dans le four à tube dont il a été parlé. On l'y soutient en l'engageant dans des tuyaux de pipe, et on lui adjoint un fil compensateur, afin de pouvoir mesurer la résistance de la partie seulement qui se trouve placée au milieu du fourneau. Autour du tuyau de pipe est enroulé le fil thermométrique, accompagné, lui aussi, de son compensateur. Une température à peu près stationnaire étant atteinte, on détermine, par des lectures faites chacune deux fois et croisées, les résistances de ces quatre fils.

Les résultats sont, pour chacun des fils étudiés, représentés par une courbe qui permettra désormais d'avoir la température du fil quand on connaîtra le rapport de sa résistance à la résistance qu'il aurait à 0° .

Si l'on veut que ces fils conservent leurs propriétés dans le cours des expériences, il importe qu'ils aient été préalablement chauffés pendant plusieurs heures à une température supérieure à celles qu'ils doivent atteindre.

Parmi les fils ainsi étudiés, je citerai :

Un fil de platine du commerce de $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre dont le coefficient moyen entre 0° et 100° était

$0,00318$;

Un fil de platine pur de $\frac{1}{20}$ de millimètre

$0,00358$;

Un fil de platine pur recouvert par la pile de platine mat

$0,003575$.

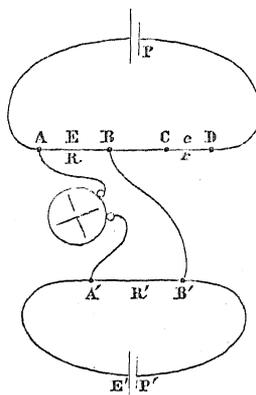
MESURE DES RÉSISTANCES PENDANT LE PASSAGE DU COURANT.

Dans le circuit fermé d'une pile P (*fig. 5*), la différence E des potentiels en deux points A et B est proportionnelle à la résistance R qui les sépare. Considérons sur le même circuit deux autres points C et D séparés par une résistance r , et appelons e la différence de leurs potentiels :

$$\frac{E}{e} = \frac{R}{r}.$$

Supposons que AB soit le fil dont il s'agit de mesurer la résistance,

Fig. 5.



et CD un fil assez gros pour ne pas s'échauffer sensiblement par le passage du courant; la résistance r sera constante et pourra servir d'unité; la mesure de R revient alors à la mesure du rapport $\frac{E}{e}$.

Considérons un second circuit dans lequel est intercalée une pile P' de force électromotrice E' . Soient R' une résistance variable comprise entre les points A' et B' et ρ la résistance constante du reste du circuit. La différence de potentiel entre les points A' et B' sera

$$E' \frac{R'}{R' + \rho}.$$

Relions maintenant le point A au point A' , le point B au point B' ,

et, sur l'une de ces branches de jonction, AA' par exemple, plaçons un galvanomètre. Réglons la résistance R' de façon que le galvanomètre reste au zéro; cela n'arrive que si la différence de potentiel entre les points A' et B' est la même qu'entre les points A et B. Alors

$$E = E' \frac{R'}{R' + \rho}.$$

Recommençons après avoir relié A' et B' aux points C et D, et soit r' la résistance à intercaler en A'B' pour ramener le galvanomètre au zéro; nous aurons de même

$$e = E' \frac{R'}{r' + \rho},$$

d'où

$$\frac{E}{e} \text{ ou } \frac{R}{r} = \frac{R'}{R' + \rho} : \frac{r'}{r' + \rho}.$$

Cette manière de mesurer la différence des potentiels en deux points d'un circuit n'est, au fond, que la méthode d'opposition de Clarke; on voit comment elle permet de déterminer les résistances d'un conducteur traversé par un courant, à la seule condition que ce courant reste constant pendant la durée de la mesure, ainsi que la force électromotrice E' de la pile auxiliaire.

Cette pile était formée de quelques éléments Daniell au sulfate de zinc ayant chacun une résistance de 1 ohm environ; le reste de la résistance désignée par ρ était constitué par une bobine de grande résistance, le plus souvent 5000 ohms. En A'B' était une caisse allant de 1 à 15000 ohms. Le galvanomètre était le même galvanomètre Thomson, qui servait aux mesures de résistance par le pont de Wheatstone.

Le fil de comparaison CD était un long fil de cuivre de 1^{mm} de diamètre enroulé d'une façon très lâche sur un grand cadre. Au début des expériences, et dans la prévision que ce fil pourrait, lui aussi, s'échauffer un peu, et, par conséquent, changer de résistance pendant le passage du courant, on lui avait adjoint un second fil de section double constitué par deux fils semblables au premier et placés côte à côte. Ce fil de section double se serait échauffé moitié moins, et la variation du rapport de leurs résistances devait permettre de mesurer cet échauffement. Or, dans une série d'expériences, les valeurs succes-

sives de ce rapport, pour des intensités croissantes du courant, ont été trouvées égales à

1,097	1,099
1,098	1,098
1,097	

Dans une autre série :

1,098	1,100	1,100
1,098	1,098	1,098
1,095	1,108	

En déterminant le même rapport par le pont de Wheatstone, on avait trouvé

1,098.

Ces nombres montrent :

1° Que le fil de comparaison ne s'échauffait pas assez pour qu'il y eût à tenir compte de la variation de sa résistance;

2° Que les résistances ainsi mesurées sont identiques à celles que donne la disposition de Wheatstone : on pouvait désirer cette vérification pour une méthode qui n'avait été appliquée jusqu'ici qu'à la mesure des forces électromotrices.

Si le fil de comparaison ne s'échauffe pas sensiblement par le passage du courant, il n'a cependant pas la même température ni, par conséquent, la même résistance dans les diverses séries d'observations. Un thermomètre était placé à côté de lui, et l'on corrigeait toujours les résistances mesurées en cherchant ce qu'on eût obtenu si le fil de comparaison était toujours resté à 18°.

Quand on fait passer dans un fil de platine tendu entre deux pinces un courant assez intense pour le rougir, la teinte paraît bien uniforme dans la région moyenne, mais les deux extrémités restent obscures. Si l'on mesure alors sa résistance et qu'on en déduise la température, on n'a que sa température moyenne. De plus, en multipliant la résistance par le carré de l'intensité du courant, on calcule une quantité de chaleur qui comprend non seulement la chaleur rayonnée ou enlevée par le gaz, mais encore la chaleur que les pinces enlèvent par conductibilité aux deux extrémités du fil.

Mais plaçons dans le même circuit que le fil principal MN (*fig. 6*) un

second fil NP plus court, identique sous tous les rapports au premier; il présentera en son milieu la même teinte que lui, et ses deux moitiés OP, ON pourront être considérées comme identiques à des portions de même longueur RN, QM, prises aux extrémités de MN. Si donc, de la résistance du fil MN, on retranche celle du fil NP, on aura la résistance de la portion à température uniforme QR, et, en multipliant cette ré-

Fig. 6.



sistance par le carré de l'intensité, on aura la chaleur produite dans la partie QR seulement, chaleur qui ne se dépense que par rayonnement et par contact avec le gaz.

C'est là une nouvelle application de cette méthode d'élimination de quantités inconnues dont le compensateur du thermomètre à air et le fil compensateur employé dans la mesure des résistances nous ont déjà offert l'exemple.

Pour mesurer les différences de potentiel aux deux extrémités des fils dont on voulait comparer les résistances, on a essayé une autre méthode, qui, si elle avait eu la même précision que celle qui vient d'être décrite, lui eût été préférable pour la rapidité des lectures. Si l'on met deux points d'un circuit en communication avec les deux armatures d'un condensateur, ce dernier se charge proportionnellement à la différence de potentiel des deux points, et si un galvanomètre est placé sur le trajet d'un des fils de jonction, l'impulsion subie par l'aiguille est proportionnelle à cette charge et, par conséquent, à la différence de potentiel, si toutefois cette impulsion ne dépasse pas quelques degrés; c'est là, on le sait, une manière de comparer rapidement et d'une façon approximative les forces électromotrices des piles. On a fait une série de mesures en se fondant sur ce principe; le condensateur était $\frac{1}{3}$ de microfarad à lames de mica, et le galvanomètre était assez sensible pour subir des impulsions facilement mesurables. Mais cet essai a montré que, si cette méthode donnait des résultats concordants avec ceux de la première, elle lui était inférieure au point de vue de la sensibilité: les observations faites par la première méthode donnaient, par la représentation graphique, des points très régulièrement distri-

bués sur une courbe; la seconde, appliquée dans les mêmes conditions, donnait des points qui se plaçaient à des distances notables de cette courbe, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre. Il est, en effet, difficile de saisir la limite d'une impulsion à moins de $\frac{1}{100}$ ou $\frac{1}{200}$ près de sa valeur, au lieu que l'on pouvait, comme on l'a montré, répondre, par l'autre procédé, du millième pour le rapport de deux résistances.

MESURE DE L'INTENSITÉ DU COURANT.

Pour mesurer l'intensité du courant, on se sert d'une boussole de Weber mise en dérivation sur le circuit principal. Les déviations sont lues par réflexion sur un miroir solidaire du barreau aimanté à l'aide d'une échelle divisée et d'une lunette placées à un mètre de distance de la boussole; une déviation de 1° correspond à peu près à 50 divisions de l'échelle, et les lectures peuvent se faire facilement à $\frac{1}{10}$ de division près.

Ces lectures présenteraient les meilleures garanties de précision sans la variation presque incessante du zéro : à de certains jours, pendant lesquels les observatoires météorologiques signalent l'existence de tempêtes magnétiques, les variations peuvent être d'une division en quelques secondes. Mais ce sont là, heureusement, des exceptions, et le plus souvent, en changeant le sens du courant dans la boussole et prenant la moyenne des lectures faites de part et d'autre du zéro, on élimine l'influence des variations de la déclinaison. On faisait ainsi chaque fois 3 lectures, et souvent, après avoir changé deux fois le sens du courant dans la boussole, on retrouvait, à $\frac{1}{10}$ ou $\frac{2}{10}$ de division près, le chiffre trouvé à la première lecture.

Il a paru utile de soumettre à une vérification les indications de la boussole. Prenons, dans une série de lectures correspondant à des courants d'intensités différentes, les valeurs obtenues pour la différence de potentiel aux deux extrémités du fil de comparaison dont la résistance reste constante. Si ces différences de potentiel $(e = E' \frac{r'}{r' + \rho})$ sont mesurées avec la même unité, c'est-à-dire si la pile E' n'a pas changé, on doit les trouver proportionnelles aux intensités du courant.

Or, dans une des séries où les déviations mesurées ont été les plus grandes, on trouve :

Déviatiou de la boussole (en divisions de l'échelle).	Rapport de la différence de potentiel observée à la déviation.
105,3	1058
173,7	1054
239,9	1056
332,8	1055
376,8	1065
437,8	1061

En présence de la presque identité de ces rapports, on peut se demander si, pour mesurer l'intensité d'un courant, on n'atteindrait pas une plus grande précision en mesurant la différence de potentiel aux deux extrémités d'une résistance constante. Cette méthode devrait être avantageuse, en effet, dans des recherches de courte durée. Mais, dans le cas présent, où les diverses séries d'expériences devaient être comparables entre elles, il a paru qu'on pouvait compter davantage sur la constance du magnétisme terrestre et des propriétés de la boussole que sur celle des éléments Daniell employés à la mesure des potentiels.

DISPOSITION GÉNÉRALE DES APPAREILS.

Cette disposition est indiquée schématiquement par la *fig. 7*.

Le fil dont on veut étudier le refroidissement et le fil plus court qui sert à éliminer l'influence des extrémités sont placés dans le prolongement l'un de l'autre entre trois gros conducteurs de cuivre. Ces conducteurs sont mastiqués dans un grand flacon A d'une dizaine de litres de capacité, couché horizontalement, et sur lequel coulent constamment plusieurs jets d'eau froide.

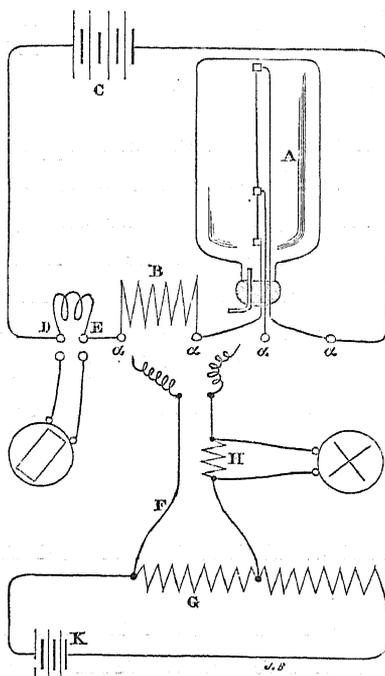
Les deux conducteurs extrêmes sont placés avec le fil B, dont la résistance constante sert de terme de comparaison, dans le circuit d'une pile d'éléments Bunsen C. On fait varier l'intensité du courant en intercalant des résistances ou en mettant un plus ou moins grand nombre d'éléments.

Les deux extrémités du fil de la boussole de Weber sont mises en

relation, par l'intermédiaire d'un commutateur, avec deux points D et E du circuit séparés par un gros fil de cuivre de résistance très faible.

Les trois fils dont on a à mesurer la résistance (fil principal, fil compensateur, fil de comparaison) communiquent avec des godets pleins

Fig. 7.



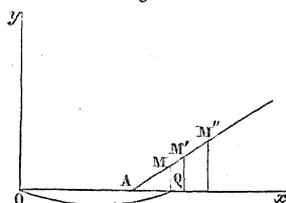
de mercure α , qui peuvent être mis facilement en communication avec l'appareil de mesure par des fils qu'on fait plonger à volonté dans tel ou tel godet; l'un de ces fils F va directement à la caisse de résistances G; l'autre y aboutit en passant par le shunt H du galvanomètre Thomson. Les deux extrémités de la caisse de résistances communiquent avec les pôles d'une pile Daniell K, et une clef à contacts successifs permet de fermer d'abord le circuit de cette pile, puis le circuit du galvanomètre.

La disposition de l'appareil de mesures permet de déterminer aussi la résistance des fils au pont de Wheatstone, mais cette méthode, ap-

pliquée à un fil très fin et placé dans le vide, devient d'un emploi difficile. Le fil s'échauffe, en effet, dès le passage du courant, et sa résistance augmente : on peut voir l'aiguille du galvanomètre dévier d'abord dans un sens, puis revenir immédiatement de l'autre côté.

Mais on peut déterminer autrement la résistance de ce fil à la température de l'enceinte : faisons passer d'abord un courant très faible ; déterminons, par la mesure des potentiels et de l'intensité, la résistance r du fil et la quantité de chaleur Q qu'il dégage. Soient r' et Q' , r'' et Q'' des quantités analogues pour des courants un peu plus forts. Représentons ceci graphiquement (*fig. 8*) en portant les résistances r en ab-

Fig. 8.



scisses et les quantités de chaleur Q en ordonnées. Les points M, M', M'' ainsi obtenus se trouveront en ligne droite; pour des excès de températures très faibles, en effet, les quantités de chaleur sont proportionnelles à ces excès, et ces excès sont eux-mêmes proportionnels aux excès de résistance. Le point A, où cette ligne coupe l'axe des x , représente la résistance qu'aurait le fil s'il perdait une quantité de chaleur nulle, c'est-à-dire s'il était à la température de l'enceinte.

Le flacon qui renferme les fils communique avec des appareils à faire le vide. Ce sont une machine de Bianchi et une trompe à mercure; celle-ci est munie d'une jauge de MacLeod permettant de mesurer les basses pressions à $\frac{1}{1000}$ de millimètre près. Entre le flacon et la trompe, se trouve un long tube contenant de l'acide phosphorique anhydre; dans les dernières expériences, on a mis en outre, dans le flacon, des fragments de potasse fondue.

Une série d'observations se fait à une pression déterminée; la première observation de la série se fait avec un courant de faible intensité; la deuxième avec un courant plus fort, et ainsi de suite; on porte de cette façon le fil qui est en expérience à des températures de plus en

plus élevées. On attend chaque fois quelques minutes, afin d'être certain que la température soit stationnaire. Ces lectures sont croisées et se font chacune deux ou trois fois. Chaque observation exige environ un quart d'heure.

On mesure la pression avant de faire passer le courant dans l'appareil. Pendant le passage du courant, la pression augmente un peu par suite de l'échauffement du gaz; mais cette augmentation est toujours très faible et souvent insensible, à cause des grandes dimensions de l'enceinte par rapport au fil. Dans une expérience, par exemple, sous une pression de 10^{mm} (hydrogène), le fil, qui mesurait $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre, étant porté au rouge, on n'observait qu'une augmentation de pression de $0^{\text{mm}},15$.

Voici un exemple d'observation :

Pression (air) mesurée à la jauge	$0^{\text{mm}},468$
Température du flacon.....	$16^{\circ},8$
Température de la salle.....	$17^{\circ},6$
Pile de potentiel.....	7^{cl} Daniell
Résistance ρ	5004 ohms.

Lectures à la boussole de Weber (avec deux interversions de courant) :

$298,9, 195,0, 299,0$; d'où $I = 103,95$.

Résistance R'	<table> <tr> <td>Fil principal.....</td> <td>$1837,9$</td> </tr> <tr> <td>Compensateur.....</td> <td>$749,7$</td> </tr> <tr> <td>Fil de comparaison...</td> <td>$612,7$</td> </tr> </table>	Fil principal.....	$1837,9$	Compensateur.....	$749,7$	Fil de comparaison...	$612,7$
Fil principal.....	$1837,9$						
Compensateur.....	$749,7$						
Fil de comparaison...	$612,7$						
Valeurs de $\frac{R'}{R'+\rho}$ ou de E.	<table> <tr> <td>Fil principal.....</td> <td>$0,26862$</td> </tr> <tr> <td>Compensateur.....</td> <td>$0,13029$</td> </tr> <tr> <td>Fil de comparaison...</td> <td>$0,10908$</td> </tr> </table>	Fil principal.....	$0,26862$	Compensateur.....	$0,13029$	Fil de comparaison...	$0,10908$
Fil principal.....	$0,26862$						
Compensateur.....	$0,13029$						
Fil de comparaison...	$0,10908$						
Résistance déduite : $\frac{0,13833}{0,10908}$	$1,2682$						
Résistance corrigée.....	$1,2570$						
Résistance déterminée à 0°	$0,5890$						
Rapport de la résistance corrigée à la résistance à 0°	$2,1341$						
Température déduite.....	373°						
Excès.....	$356^{\circ},2$						
Produit de la résistance par le carré de l'intensité ou chaleur développée.....	13583						

On peut se demander ce que vaut, en calories par seconde, la quantité de chaleur ainsi représentée par le produit de la résistance du fil par le carré de l'intensité du courant, cette résistance et cette intensité

étant mesurées avec les unités tout à fait arbitraires qui ont été adoptées. Pour le savoir, on a fait une lecture d'intensité à la boussole de Weber, en même temps qu'on faisait passer le courant par un fil de platine plongeant dans un calorimètre rempli d'alcool. La quantité de chaleur, mesurée avec les unités précédentes, se trouvait représentée par le nombre

$$17\,467,$$

et la variation de température du calorimètre indiquait un dégagement de

$$0^{\text{Cal}},0959 \text{ (gramme)}$$

par seconde. Par suite, dans les résultats numériques qui vont être rapportés, une quantité de chaleur représentée par

$$1000$$

correspond à

$$0^{\text{Cal}},00549 \text{ par seconde.}$$

Par exemple, un fil de platine de $0^{\text{m}},10$ de long et de $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre, rayonne environ, à 1000° ,

$$0^{\text{Cal}},219.$$

Mais cette évaluation n'est qu'approximative, la boussole de Weber ayant été légèrement déplacée lors de l'expérience calorimétrique. Une estimation plus exacte n'aurait d'ailleurs d'intérêt que si l'on avait pu déterminer avec précision la surface des fils employés.

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES RÉSULTATS.

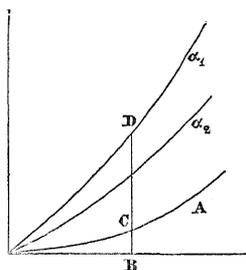
Une série d'observations faites à une pression déterminée P_1 donne, pour différents excès de température, la quantité de chaleur perdue par le fil soumis à l'expérience. Le résultat de chaque observation est indiqué, sur une feuille de papier quadrillé, par un point dont l'abscisse représente l'excès, et l'ordonnée la quantité de chaleur perdue.

La ligne continue α_1 qui passe par tous ces points (*fig. 9*) représente, pour la pression P_1 , la relation qui lie la quantité de chaleur à l'excès de température.

Une série faite à une pression moindre P_2 donnera une courbe dont les ordonnées seront, pour des abscisses égales, inférieures aux ordonnées de la courbe α_1 .

Enfin une série faite dans le vide absolu donne une courbe A dont les ordonnées représentent les quantités de chaleur perdues dans le vide.

Fig. 9.

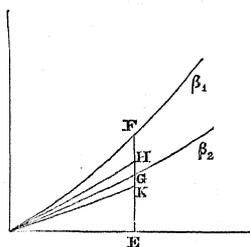


Chacune de ces séries comprend une dizaine d'observations, quelquefois davantage, et, si l'on met à part les expériences faites dans l'hydrogène, qui ont présenté de singulières anomalies, les points correspondant à chaque série se trouvent distribués avec une grande régularité.

Revenons à la courbe α_1 . L'ordonnée BD d'un quelconque D de ses points représente une quantité de chaleur qui se compose de deux parties :

- 1° La chaleur qui se perdrait dans le vide, ou chaleur rayonnée;
- 2° La chaleur enlevée par le gaz.

Fig. 10.

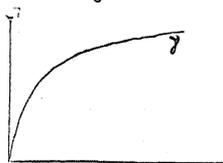


La première est représentée par la portion BC qu'intercepte sur BD la courbe A. Si donc, des ordonnées des courbes $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ on re-

tranche les ordonnées correspondantes de la courbe A, on aura de nouvelles courbes β_1, β_2, \dots (fig. 10) qui représenteront, pour chacune des pressions P_1, P_2 , la relation entre *l'excès de température et la chaleur enlevée par le gaz*.

Considérons maintenant sur les courbes β les ordonnées EF, EG, ... qui correspondent à un même excès, par exemple 100° , et construisons de nouvelles courbes ayant pour abscisses les pressions P_1, P_2, \dots et pour ordonnées les longueurs EF, EG, ...; chacune de ces nouvelles courbes, γ (fig. 11), représente, pour un excès de température déterminé, 100° par exemple, la relation entre *la pression et la chaleur enlevée par le gaz*.

Fig. 11.



On a ainsi tracé les courbes correspondant aux excès $100^\circ, 200^\circ, 300^\circ, \dots$

Comme l'allure de ces courbes change d'une manière continue à mesure que l'excès augmente, il était intéressant de connaître l'allure d'une courbe correspondant à un excès très petit. Pour cela, on a mené les tangentes à l'origine des courbes β , mesuré les longueurs EH, EK interceptées par ces tangentes sur l'ordonnée correspondant à 100° , et pris ces longueurs comme ordonnées d'une courbe dont les abscisses représentaient les pressions. Cette courbe peut être regardée comme une courbe correspondant à un excès très petit, mais dont les ordonnées seraient agrandies, par exemple comme la courbe d'excès 1° dont les ordonnées seraient centuplées. Je l'appellerai *courbe d'excès nul*.

Les points qui servent à tracer les lignes γ ne sont pas toujours aussi régulièrement distribués que ceux qui servent à tracer les lignes α . Cela se conçoit d'ailleurs : chacune des lignes α relie entre elles les observations d'une seule et même série; une ligne γ relie plusieurs séries échelonnées sur une quinzaine de jours; les erreurs commises dans la lecture des pressions, les variations de température des diverses

parties de l'appareil, peut-être les variations du magnétisme terrestre qui influent sur les indications de la boussole, enfin et surtout les défauts du tracé des courbes α , sont autant de causes qui permettent d'expliquer de petites irrégularités.

L'eau qu'on laisse couler sur l'enceinte pour la maintenir froide n'est pas tous les jours à la même température, et ces variations suffisent pour empêcher les diverses séries d'être comparables entre elles. Mais ces variations n'étant que de quelques degrés, on peut, avec une approximation suffisante, corriger les résultats et les ramener tous à ce qu'ils seraient si la température de l'enceinte restait constante : les expériences de Dulong et Petit ont montré en effet que le refroidissement dû au gaz était indépendant de la température de l'enceinte; il suffit donc de faire porter la correction sur la quantité de chaleur rayonnée.

Admettons, pour faire cette correction, que la loi du rayonnement soit représentée par la formule de Dulong et Petit :

$$Q = ma^{\theta}(a^t - 1),$$

dans laquelle θ représente la température de l'enceinte, t l'excès et a la constante 1,0077.

La quantité dont il faudra corriger une observation faite à θ' pour le ramener à θ sera

$$ma^{\theta'}(a^t - 1) - ma^{\theta}(a^t - 1) = (a^{\theta'} - a^{\theta})m(a^t - 1) = (a^{\theta' - \theta} - 1)ma^{\theta}(a^t - 1),$$

ce qui est approximativement égal à

$$(\theta' - \theta) \log a . ma^{\theta}(a^t - 1)$$

ou encore à

$$(\theta' - \theta)(a - 1)ma^{\theta}(a^t - 1).$$

Une série d'observations faite dans le vide faisait connaître, pour une valeur déterminée de θ et pour les diverses valeurs de t , les valeurs correspondantes de la quantité de chaleur rayonnée. Ce sont ces valeurs qu'on mettait à la place de $ma^{\theta}(a^t - 1)$ pour calculer l'expression précédente.

On a ainsi ramené à une même température les observations des diverses séries.

I. — Chaleur perdue dans le vide.

Toutes les expériences pouvant conduire à une estimation des quantités de chaleur perdues dans le vide absolu sont résumées dans le Tableau A. Voici la signification des nombres renfermés dans les colonnes de ce Tableau :

COLONNE 1. — Excès de température.

COLONNE 2. — Quantités de chaleur perdues dans le vide, déduites d'une série d'observations dans laquelle la pression, qui n'est plus mesurable à la jauge de MacLeod, est certainement inférieure à $\frac{1}{10} \mu$ (μ désignant le millième de millimètre) et peut être considérée comme nulle. C'est cette série qui renferme le plus grand nombre d'observations; elle est très régulière et doit être considérée comme la meilleure de toutes.

COLONNE 3. — Quantités de chaleur déduites d'une série faite sous la même pression que la précédente, avec le même fil et à dix jours d'intervalle. Entre les deux séries, une grande masse de fer (machine pneumatique de Bianchi) a été introduite dans la salle d'expériences; le champ magnétique de la boussole a pu être altéré, et l'unité de chaleur un peu changée, ce qui permet d'expliquer la différence entre les nombres des colonnes 2 et 3.

COLONNE 4. — Rapports des nombres de la colonne 3 à ceux de la colonne 2. Ces rapports sont à peu près les mêmes; les deux séries conduisent donc à la même loi de rayonnement.

COLONNE 5. — Quantités de chaleur déduites de quatre séries faites sous les pressions 21, 16, 5 et 1μ (air atmosphérique). Pour les calculer, on a supposé que la loi de la perte par l'air, observée entre ces pressions, se continuait jusqu'à la pression 0.

COLONNE 6. — Rapport des nombres des colonnes 5 et 2.

COLONNE 7. — Quantités de chaleur déduites de deux séries faites sous les pressions 3 et 1μ (hydrogène).

COLONNE 8. — Rapport des nombres des colonnes 7 et 2.

COLONNE 9. — Quantités de chaleur déduites de quatre séries faites sous les pressions 37, 22, 12 et 5μ (acide sulfureux). L'interpolation présente, pour les basses températures, un peu moins de garantie que dans les séries précédentes : sous la pression de 5μ , en effet, et à 100° d'excès, la quantité de chaleur enlevée par le gaz se trouve être à peu près égale à la quantité de chaleur rayonnée dans le vide.

COLONNE 10. — Rapport des nombres des colonnes 9 et 2.

Remarque. — Les nombres contenus dans les colonnes 2, 3, 5, 7 et 9 se rapportent à un même fil de $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre; ils vont en augmentant, ce qui semble prouver que les réchauffements et refroidissements successifs, auxquels ce fil a été soumis, ont légèrement augmenté son pouvoir émissif.

COLONNE 11. — Quantités de chaleur déduites de deux séries faites sous les pressions 12 et 2μ (air atmosphérique).

COLONNE 12. — Rapports des nombres des colonnes 11 et 2.

COLONNE 13. — Quantités de chaleur déduites de deux séries faites sous les pressions 3 et 1μ (hydrogène).

La dernière série ne présentait plus la régularité des précédentes, et l'on voit que les rapports aux nombres de la colonne 2 (ces rapports sont contenus dans la colonne 14) pré-

sentent des écarts considérables. D'autre part, les nombres de la colonne 13 se rapportent au même fil ($\frac{1}{20}$ de millimètre) que ceux de la colonne 11, et, cependant, sont beaucoup plus petits.

COLONNE 15. — Quantités de chaleur déduites d'une série faite sous la pression de 1 μ (air atmosphérique), avec un fil de platine recouvert par la pile de platine mat.

TABLEAU A.

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.
0	0	0		0		0		0		0		0		0	
50	37	36	0,97												
100	92	86	0,94	90	0,98	90	0,98	100	1,09	70	0,76	60	0,63		
150	170	161	0,95												
200	279	276	0,99	270	0,97	270	0,97	290	1,04	210	0,75	180	0,65		
250	442													730	1,65
300	690	676	0,98	680	0,99	690	1,00	700	1,01	550	0,75	410	0,59	1140	1,65
400	1650	1560	0,94	1570	0,95	1620	0,98	1650	1,00	1300	0,79	900	0,54	2300	1,40
500	3150	3200	1,01	3110	0,99	3200	1,01	3500	1,11	2350	0,74	1850	0,59	5150	1,60
600	5900	5900	1,00	5700	0,97	6100	1,04	6400	1,08	4350	0,74	3550	0,60	9800	1,66
700	10000	10100	1,01	9800	0,98	10380	1,04	10800	1,08	7400	0,74	6200	0,62	16300	1,63
800	15950	15500	0,97	15710	0,99	16500	1,04	17300	1,08	12050	0,74	10050	0,63	24000	1,50
900	24050	23900	0,99	23400	0,97	25000	1,04	27000	1,12					35000	1,46
1000	35000	34700	0,99	34600	0,99	36300	1,04	40200	1,15					50000	1,43
			0,98		0,98		1,02		1,08		0,75		0,61		1,55

Il était intéressant de comparer les résultats qui viennent d'être rapportés avec la formule

$$ma^{\theta}(a^t - 1),$$

obtenue dans des conditions toutes différentes par Dulong et Petit; cette formule, établie pour des excès inférieurs à 250°, a été confirmée, au moins d'une manière approchée et pour les mêmes limites de température, par divers physiciens; la comparaison était donc, pour la nouvelle méthode exposée ici, une sorte d'épreuve qui devait permettre de juger de sa valeur. On a reproduit, dans le Tableau suivant, les nombres de la colonne 2 et placé en regard les valeurs calculées de l'expression $ma^{\theta}(a^t - 1)$, a étant égal à 1,0077 et le coefficient constant ma^{θ} choisi de telle sorte que la valeur calculée fût égale à la valeur observée pour l'excès 150°.

Excès de température.	Quantités de chaleur	
	observées.	calculées.
0.....	0	0
50.....	37	36,7
100.....	92	90,7
150.....	170	170
200.....	279	286,2
250.....	442	456,8
300.....	690	707
400.....	1650	1613
500.....	3150	3565
600.....	5900	7768
700.....	10000	16820
800.....	15950	36310
900.....	24050	78280
1000.....	35000	168664

On voit que la concordance est satisfaisante jusqu'à 400°. A partir de cette température, les nombres calculés croissent beaucoup trop rapidement, comme l'avaient déjà fait remarquer, du reste, plusieurs expérimentateurs.

II. — Chaleur enlevée par le gaz.

1° *Influence de la pression. — Variation de cette influence avec la température.* — Le fil de platine de $\frac{1}{10}$ de millimètre pour lequel on a indiqué plus haut la chaleur perdue dans le vide à diverses températures a été étudié dans une atmosphère d'air sec sous vingt pressions différentes et comprises entre 300^{mm} et 0. Chacune des vingt séries donne des résultats réguliers; les points qui servent à tracer les courbes γ sont aussi régulièrement distribués; seule, la courbe d'excès nul est moins bien déterminée; quelques-unes de ses ordonnées sont indiquées dans le Tableau suivant :

TABLEAU I.

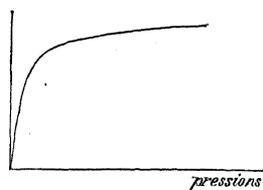
Pressions. mm	Ordonnées.
300.....	13700
200.....	12800
100.....	11500
50.....	10350
10.....	8550

TABLEAU I (suite).

Pressions. mm	Ordonnées.
5.....	8100
1.....	5650
0,5.....	4050
0,1.....	1330
0,05.....	780
0,01.....	160

La courbe, dont la *fig. 12* peut donner une idée, est partout concave vers l'axe des pressions; les ordonnées croissent d'abord rapidement,

Fig. 12.



puis de moins en moins vite : entre 100 et 200^{mm}, la variation est plus petite qu'entre 0 et 0,3. La courbe est caractérisée d'une manière générale par sa courbure accentuée aux environs de 5 ou 10^{mm}.

La courbe correspondant à un excès de 100°, mieux déterminée que la précédente, donne, pour les quantités de chaleur enlevées par l'air sous diverses pressions, les valeurs suivantes :

TABLEAU II.

Pressions. mm	Quantités de chaleur.
300.....	17200
200.....	16000
100.....	14300
50.....	12800
10.....	9750
5.....	8900
1.....	5920
0,5.....	3900
0,1.....	1200
0,05.....	700

Quantité de chaleur perdue dans le vide..... 90

Cet excès de 100° étant compris dans les limites des expériences de Dulong et Petit, il était intéressant de savoir si les résultats qui sont rapportés ici vérifiaient la loi trouvée dans des conditions toutes différentes par ces éminents physiciens. Le Tableau qui suit indique, pour des pressions décroissant en progression géométrique, les quantités de chaleur enlevées par l'air telles qu'on les déduit de la courbe d'excès 100°; le rapport de chacune de ces quantités de chaleur à la suivante est indiqué dans la troisième colonne :

TABLEAU III.

Pressions. mm	Quantités de chaleur.	Rapports.
200.....	16000	1,12
100.....	14300	1,12
50.....	12800	1,13
25.....	11300	1,12
12,5.....	10065	1,09
6,25.....	9200	1,09
3,12.....	8400	1,18
1,56.....	7100	1,38
78.....	5150	1,55
39.....	3330	

D'après la loi de Dulong et Petit, le refroidissement dû à l'air est représenté par la formule

$$np^b,$$

p désignant la pression, n et b des constantes; pour des pressions décroissant en progression géométrique, les quantités de chaleur décroissent aussi en progression géométrique. On voit que cette loi se vérifie assez bien, dans le cas présent, pour des pressions supérieures à 3^{mm}; seulement, la valeur numérique déduite, pour l'exposant b , des nombres précédents ($\frac{\log 1,12}{\log 2} = 0,163$) est beaucoup plus petite que la valeur (0,45) donnée par Dulong et Petit; il est à remarquer qu'elle se rapproche de la valeur minima (0,129) obtenue par MM. de la Provostaye et Desains.

Au-dessous de 3^{mm}, les quantités de chaleur décroissent plus rapidement que ne l'indiquerait une formule exponentielle. Les Tableaux qui précèdent mettent en évidence l'importance que garde encore, même à des pressions très faibles, le refroidissement dû au gaz, vis-à-vis du

rayonnement; sous une pression de 200^{mm}, l'air sec enlève, à 100° d'excès, 180 fois autant de chaleur que le rayonnement, 12 fois encore à 0^{mm},1, et il faut réduire la pression à 0^{mm},006 environ pour que l'air n'enlève que la même quantité de chaleur que le rayonnement.

La courbe d'excès 100° présente la même allure générale que la courbe d'excès nul; mais elle s'en distingue en ce que sa courbure est moins accentuée; on voit, en effet, à l'inspection des Tableaux I et II, que les ordonnées de la première sont plus grandes aux pressions élevées, plus petites aux basses pressions que les ordonnées de la seconde.

On retrouve la même transformation en passant de la courbe de 100° à celle de 200°, de celle de 200° à celle de 300°, et ainsi de suite, jusqu'à 1000°. Pour rendre ces courbes plus facilement comparables, divisons par 2 les ordonnées de celle de 200°, par 3 les ordonnées de celle de 300°, etc. On obtient alors des lignes qui se disposent comme l'indique la *fig.* 13. On trouve d'ailleurs, dans le Tableau suivant, les rapports des ordonnées ainsi réduites aux ordonnées correspondantes de la courbe d'excès nul :

TABLEAU IV.

Pressions. mm	100°.	200°.	300°.	400°.	500°.	600°.	700°.	800°.	900°.	1000°.
300.....	1,25	1,40								
200.....	1,25	1,41	1,54							
100.....	1,25	1,41	1,55	1,66						
50.....	1,24	1,40	1,54	1,64						
10.....	1,14	1,22	1,32	1,40						
5.....	1,10	1,14	1,19	1,25	1,27	1,23				
1.....	1,04	1,03	1,03	1,01	1,00	0,97	0,94	0,91		
0,5.....	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,84	0,81	0,79	0,76	0,73
0,1.....	0,90	0,88	0,86	0,84	0,85	0,81	0,79	0,79	0,79	0,77
0,05.....	0,90	»	»	»	»	»	»	»	»	»
0,01.....	0,89	0,88	0,86	0,83	0,79	0,75	0,71	0,64	0,65	0,62

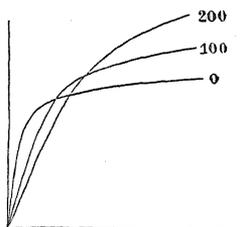
La régularité avec laquelle se suivent les nombres inscrits au Tableau IV permet de conclure, même en faisant très large la part des erreurs d'observation dans une méthode en réalité compliquée, que la loi du refroidissement dû au gaz n'est pas la même à toutes les températures, qu'elle ne peut pas, par conséquent, être représentée par une expression de la forme

$$Af(p),$$

A désignant une fonction de la température, $f(p)$ une fonction de la pression seulement.

On remarquera cependant que, dans chacune des colonnes verticales, les nombres correspondant aux pressions comprises entre 300 et 50^{mm} sont les mêmes. Donc, entre ces limites, mais entre ces limites seulement, les ordonnées des différentes courbes sont proportionnelles, et la loi du refroidissement dû au gaz se montre indépendante de la température; cette indépendance n'est d'ailleurs constatée que pour des températures inférieures à 400°; l'intensité du courant capable de

Fig. 13.



maintenir sous ces pressions élevées le fil de platine à une température supérieure eût exigé une autre disposition des appareils de mesure.

Les séries d'observations dont on vient de rapporter les résultats avaient été précédées de quelques essais compris entre les pressions 1^{mm} et 0^{mm}. Ces expériences préliminaires avaient donné des quantités de chaleur toutes un peu plus grandes que celles qui furent trouvées par la suite. La différence, qui est en moyenne de $\frac{1}{10}$, doit tenir à ce que l'appareil, nouvellement installé, n'avait pas encore eu le temps de se bien dessécher. On sait, en effet, d'après les travaux de MM. Kundt et Warburg, combien les plus légères traces d'humidité peuvent, aux basses pressions, changer le pouvoir refroidissant d'un gaz.

2° *Influence de la température. — Variation de cette influence avec la pression.* — A une pression déterminée, la quantité de chaleur enlevée par l'air est d'autant plus grande que la température du fil est plus élevée. Les courbes β traduisent la relation qui lie ces deux quantités pour les pressions auxquelles on a fait les expériences. Si l'on veut avoir cette relation pour une pression quelconque, on peut se servir des courbes γ dont on mesure les ordonnées correspondant à une

même pression; c'est ainsi qu'on a déterminé les nombres que renferme le Tableau V; ils indiquent, pour un certain nombre de pressions, les quantités de chaleur enlevées par l'air aux excès de température 100°, 200°, etc.

On a inscrit dans le même Tableau les différences successives des quantités de chaleur correspondant à une pression déterminée.

Entre 300^{mm} et 10^{mm} et pour des excès inférieurs à 400°, ces différences vont en augmentant à mesure que l'excès croît; en d'autres termes, les quantités de chaleur enlevées par l'air croissent plus vite que l'excès: la courbe qui représenterait ces quantités de chaleur serait convexe vers l'axe des températures.

Entre 5^{mm} et 1^{mm} les différences augmentent d'abord, puis diminuent à partir d'une température d'autant plus basse que la pression est plus faible; les courbes représentatives auraient un point d'inflexion qui se rapprocherait de l'origine.

Enfin, en deçà de la pression 1^{mm}, les différences vont toujours en diminuant; les courbes seraient tout entières concaves vers l'axe des températures.

TABLEAU V.

Excès.	Pressions.									
	300 ^{mm} .	50 ^{mm} .	10 ^{mm} .	5 ^{mm} .	3 ^{mm} .	2 ^{mm} .	1 ^{mm} .	0 ^{mm} ,5.	0 ^{mm} ,1.	0 ^{mm} ,01.
0.....	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100....	17200	12800	9750	8900	8320	7600	5920	3900	1200	143
	21400	16260	11350	9600	8580	7900	5820	3750	1150	141
200....	38600	29060	21100	18500	16900	15500	11740	7650	2350	284
		18660	12800	10500	9150	8400	5690	3550	1100	129
300....		47720	33900	29000	26050	23900	17430	11200	3450	413
		20310	13900	11500	9500	7900	5520	3300	1050	119
400....		68030	47800	40500	35550	31800	22950	14500	4500	532
				11000	8400	7450	5220	3050	1000	98
500....				51500	43950	39250	28170	17550	5500	630
				8500	8250	6900	4780	2850	950	89
600....				60000	52200	46150	32950	20400	6450	719
					8100	6350	4250	2700	950	74
700....					60300	52500	37200	23100	7400	793
							3900	2450	1000	72
800....							41100	25550	8400	865
								2150	1000	70
900....								27700	9400	935
								1800	900	65
1000....								29500	10300	1000

Une formule exponentielle analogue à la formule de Dulong et Petit représentant assez bien l'influence de la pression pour les pressions élevées, il était naturel de chercher si, dans les mêmes limites, une formule exponentielle représenterait aussi l'influence de l'excès de température, et si le même exposant conviendrait à diverses pressions, de même que, dans la première, le même exposant convenait à diverses températures. On a inscrit dans le Tableau suivant, et pour les pressions 300, 200, 100 et 50, les nombres correspondant à des excès croissant en progression géométrique 50°, 100°, 200°, 400°, ainsi que les rapports de chacun de ces nombres au précédent :

TABLEAU VI.

Pressions. mm	Excès.							
	50°.		100°.		200°.		400°.	
300	7650	2,25	17200	2,25	38600			
200	7050	2,27	16000	2,26	36200			
100	6400	2,24	14300	2,28	32600	2,33	76200	
50	5700	2,25	12800	2,27	29060	2,34	68030	

Jusqu'à 200°, les différences entre les rapports inscrits ne sont pas supérieures aux erreurs possibles; on peut donc, en dedans des limites énoncées, regarder l'influence de l'excès comme représentée par une formule exponentielle, telle que

$$B t^c,$$

B désignant une fonction de la pression seulement et t l'excès de température. La valeur moyenne des rapports précédents étant 2,26, on en déduit, pour l'exposant c , la valeur

$$\frac{\log 2,26}{\log 2} = 1,173.$$

3° *Influence du diamètre du fil.* — Les expériences dont on vient de rapporter les résultats étaient faites avec un fil de platine du commerce de $\frac{1}{10}$ de millimètre environ; le flacon servant d'enceinte avait un diamètre de 17^{cm}. Si l'on avait pris un fil aussi fin, c'était afin d'avoir une résistance assez grande pour qu'on pût facilement en constater les

variations qui servaient à la mesure des températures. Si l'on avait choisi en même temps une enceinte aussi vaste, c'était dans l'espoir de réaliser la condition relativement simple d'une enceinte dont on pourrait regarder les dimensions comme infiniment grandes par rapport à celles du corps soumis au refroidissement. Si les lois de ce dernier phénomène ne dépendaient que des grandeurs relatives du corps et de l'enceinte, on devait les retrouver sans altération en opérant sur des fils plus fins encore.

En vue de cette recherche, on mit en expérience du fil de platine de $\frac{1}{20}$ de millimètre environ dans une enceinte un peu plus grande encore que la précédente, un flacon mesurant $0^m,21$ de diamètre. C'était un fil de platine pur que je devais à l'obligeance de M. Debray; il fut préalablement recuit pendant plusieurs heures par le passage d'un courant qui le maintenait au rouge; il a montré, après cela, une constance remarquable de ses propriétés électriques: sept déterminations de sa résistance à 0° , faites dans le cours des expériences et entre lesquelles on le portait au rouge vif, ont donné les nombres suivants:

1990, 1995, 1994, 1995, 1995, 1994, 1993,

dont la moyenne est 1993. La variation de sa résistance avec la température fut étudiée sur un bout qui avait été recuit au four.

On a fait, avec ce fil, douze séries d'observations dans des atmosphères d'air sec dont les pressions ont été comprises entre 600^{mm} et $0,002$. Les courbes qui les représentent sont toutes régulières, et elles ont la même forme générale que les précédentes; l'important est de savoir si elles leur sont absolument semblables; en d'autres termes, si la loi du refroidissement est la même pour un fil de $\frac{1}{20}$ de millimètre que pour un fil de $\frac{1}{10}$.

Prenons d'abord la courbe d'excès nul; on a inscrit dans le Tableau suivant quelques-unes de ses ordonnées, ainsi que leur rapport aux ordonnées de la courbe relative au fil de $\frac{1}{10}$.

TABLEAU VII.

Pressions. mm	Ordonnées.	Rapports.
300.....	12950	0,94
200.....	12200	0,95
100.....	11000	0,95
50.....	9900	0,95
10.....	8350	0,98
5.....	8000	0,99
1.....	3950	0,70
0,5.....	2830	0,70
0,01.....	90	0,56

On voit que, jusqu'à 5^{mm}, le rapport est à peu près constant, ou la loi du refroidissement est la même pour les deux fils; en deçà de 5^{mm}, les quantités de chaleur diminuent plus rapidement pour le fil de $\frac{4}{20}$; aux très basses pressions, le fil le plus fin se refroidit relativement moins que le plus gros.

Pour comparer les courbes correspondant aux excès 100°, 200°, etc. à la courbe d'excès nul, nous diviserons par 1 les ordonnées de la première, par 2 celles de la deuxième, etc., comme nous l'avons déjà fait, et nous prendrons le rapport des nombres ainsi obtenus aux nombres correspondant à l'excès nul; on a ainsi les valeurs renfermées dans le Tableau suivant.

TABLEAU VIII.

Pressions. mm	100°.	200°.	300°.	400°.	500°.	600°.	700°.
300.....	1,21	1,47					
200.....	1,23	1,47					
100.....	1,24	1,45					
50.....	1,25	1,44					
10.....	1,12	1,27	1,38				
5.....	0,99	1,00	1,01				
1.....	0,96	0,93	0,88	0,84	0,81		
0,5.....	0,91	0,82	0,76	0,71	0,67	0,64	0,61
0,111.....	0,82	0,77	0,69	0,62	0,58	0,53	0,48
0,05.....	0,87	0,74	0,60	0,53	0,50	0,46	0,43

Ce Tableau offre une ressemblance évidente avec le Tableau IV; on peut seulement remarquer que les derniers rapports inscrits dans une même colonne verticale décroissent un peu plus rapidement; mais ce

qu'il y a d'essentiel à noter, c'est qu'ils varient dans le même sens, après être restés constants, avec les mêmes valeurs, dans les mêmes limites de pression. On peut donc dire que l'influence de la température sur la variation du pouvoir refroidissant de l'air avec la pression s'est montrée la même avec les deux fils.

Nous allons retrouver la même allure dans la variation du pouvoir refroidissant avec l'excès de température, et la même influence de la pression sur cette variation. Le Tableau suivant est l'analogue du Tableau V, mais on s'est contenté d'y inscrire, pour une même pression, les différences successives des quantités de chaleur enlevées aux excès 0°, 100°, 200°, etc.

TABLEAU IX.

Excès.	Pressions.										
	300 ^{mm} .	50 ^{mm} .	10 ^{mm} .	5 ^{mm} .	3 ^{mm} .	2 ^{mm} .	1 ^{mm} .	0 ^{mm} .	5.0 ^{mm} .	111.0 ^{mm} .	05.
0...	15700	12350	9350	7900	6250	5460	3800	2580	680	350	
100...	22400	16225	11850	8100	6000	4990	3600	2070	520	240	
200...			13300	8300	5750	5050	3000	1780	420	135	
300...					5450	4600	2900	1620	330	125	
400...					5500	4250	2700	1450	300	150	
500...								1400	200	100	
600...								1150	200	100	
700...											

Aux pressions élevées, les différences augmentent à mesure que l'excès croît; aux basses pressions, elles diminuent. Le changement se produit vers 4^{mm}; avec le fil de $\frac{1}{10}$ il n'avait lieu que dans les environs de 1^{mm}. Sans doute, au-dessus de 4^{mm}, les différences doivent d'abord augmenter pour diminuer ensuite, comme on a pu le constater dans les premières expériences. Mais ici les observations sont restées comprises entre des limites de température trop restreintes pour mettre le même phénomène en évidence.

Toutes les quantités de chaleur inscrites dans les Tableaux qui précèdent sont évaluées de la même manière : chacun des nombres qui les représentent est le produit brut du nombre qui représente la résistance du fil évaluée avec la résistance du fil de comparaison pour unité, par le carré du nombre de divisions qui représente la déviation de la boussole de Weber. Les nombres inscrits dans les Tableaux sont donc comparables.

Or les deux fils de $\frac{1}{10}$ et de $\frac{1}{20}$ de millimètre avaient à peu près la même longueur; le dernier était seulement un peu plus long que le premier; sa surface était donc un peu plus de la moitié de la surface du premier. Ce rapport des deux surfaces semble assez bien indiqué par celui des quantités de chaleur rayonnées dans le vide, tel qu'il est donné par le Tableau A (Tableau de quantités de chaleur perdues dans le vide), dans la seconde des colonnes relatives au fil de $\frac{1}{20}$: ce rapport est en moyenne 0,6.

On s'attend à trouver le même rapport entre les quantités de chaleur enlevées par l'air, à trouver, en d'autres termes, que cette quantité de chaleur est proportionnelle à la surface du fil. Le Tableau VII montre déjà qu'il n'en est rien, du moins aux fortes pressions, car le rapport des quantités de chaleur enlevées aux deux fils pour un excès très petit s'y montre compris entre 0,94 et 0,99 et ne semble prendre la valeur 0,6 qu'aux pressions très faibles. Pour des excès de 100° et 200°, ce rapport a les valeurs suivantes :

TABLEAU X.

Pressions. mm	Excès 100°.	Excès 200°.
300.....	0,91	0,99
200.....	0,94	0,98
100.....	0,96	0,98
50.....	0,96	0,98
10.....	0,96	1,00

Ainsi, au moins pour des fils très fins et *placés horizontalement*, le refroidissement par l'air ne serait pas proportionnel à la surface, mais serait relativement plus grand pour les fils de plus petit diamètre.

Ceci n'a rien de paradoxal et se trouve même en accord avec des faits déjà connus. Le pouvoir refroidissant des gaz a en effet des rapports intimes avec leur viscosité, c'est-à-dire avec la résistance qui s'oppose au mouvement relatif d'un corps quelconque et d'une masse gazeuse en contact avec lui : l'étude, fondée sur la théorie cinétique du pouvoir conducteur des gaz, conduit à des formules analogues à celles du frottement; d'autre part, les courants de convection qui, dans une masse gazeuse nécessairement soumise à l'action de la pesanteur,

prennent naissance autour d'un corps chaud et doivent exercer une action considérable sur son refroidissement, rencontrent, à sa surface, le même obstacle que le même corps, animé d'un mouvement de translation, rencontrerait dans une atmosphère en repos. Or l'étude expérimentale de la résistance opposée par l'air au mouvement d'un objet solide a montré que cette résistance diminuait moins vite que la surface de l'objet; il n'est pas étonnant de retrouver un fait semblable dans l'étude du refroidissement.

4° *Influence de la nature du gaz.* — On a choisi parmi les gaz faciles à obtenir purs ceux qui différaient le plus par leurs propriétés physiques : l'acide sulfureux, le plus facilement liquéfiable de tous, le plus lourd après le chlore, et l'hydrogène.

L'acide sulfureux a été expérimenté avec le fil de $\frac{1}{10}$ de millimètre; pour en remplir l'appareil, on fit d'abord le vide à 3^{mm},5; on laissa rentrer, à la pression atmosphérique, de l'acide sulfureux préparé avec de l'acide sulfurique et du mercure; on fit de nouveau le vide à 5^{mm} et on laissa de nouveau rentrer l'acide. Une éprouvette de gaz, extraite de l'appareil à l'aide de la trompe, et dans laquelle on introduisit de l'eau, ne laissa, comme résidu de dissolution, qu'une bulle insignifiante.

Les résultats obtenus dans treize séries d'observations comprises entre les pressions 300^{mm} et 0^{mm},005 sont aussi réguliers qu'avec l'air, et se présentent avec les mêmes caractères généraux. Voici, par exemple, les rapports des ordonnées *réduites* des courbes correspondant aux excès 100°, 200°, etc., aux ordonnées de la courbe d'excès nul :

TABLEAU XI.

Pressions. mm	100°.	200°.	300°.	400°.	500°.	600°.	700°.	800°.	900°.	1000°.
300.....	1,25	1,56	1,85	2,15						
200.....	1,25	1,56	1,85	2,16						
100.....	1,27	1,57	1,87	2,15						
50.....	1,24	1,54	1,85	2,11	2,35					
10.....	1,16	1,40	1,62	1,82	2,00					
5.....	1,10	1,32	1,55	1,69	1,73					
1.....	1,08	1,14	1,20	1,25	1,29	1,33	1,37			
0,5.....	1,02	1,07	1,13	1,15	1,16	1,16	1,15			
0,1.....	1,04	1,06	1,08	1,07	1,04	0,94	0,95	0,90	0,86	
0,037....	1,00	1,02	1,02	0,96	0,91	0,86	0,82	0,77	0,73	0,70

Les courbes β présentent le même aspect qu'avec l'air, à cela près qu'elles ne se transforment qu'à des pressions plus faibles : la concavité vers l'axe des températures n'apparaît qu'au-dessous de 1^{mm} , et, à $0^{\text{mm}},04$ encore, elles montrent une légère convexité dans le voisinage de l'origine.

L'hydrogène a été expérimenté avec les deux fils de $\frac{1}{10}$ et $\frac{1}{20}$ de millimètre. Les résultats, surtout avec le premier, sont peu réguliers; de plus, le grand pouvoir refroidissant de ce gaz n'a permis d'opérer, aux pressions élevées, qu'entre des limites restreintes de température. Cependant, les observations confirment ce qu'avaient appris les précédentes sur l'influence de la pression, et aussi sur l'influence du diamètre du fil.

Il nous reste maintenant à comparer entre elles les quantités de chaleur qu'enlèvent, dans les mêmes conditions, les trois gaz étudiés, à évaluer, en d'autres termes, leur pouvoir refroidissant relatif.

Le Tableau suivant renferme les ordonnées de la courbe d'excès nul pour l'acide sulfureux, et leur rapport aux ordonnées de la courbe obtenue dans les mêmes conditions avec l'air :

TABLEAU XII.

Pressions. mm	Ordonnées.	Rapports.
300	6900	0,503
200	6400	0,500
100	5800	0,504
50	5200	0,502
10	4300	0,503
5	4030	0,497
3	3800	0,496
2	3500	0,500
1	3100	0,548
0,5	2760	0,681
0,1	1250	0,940

Le rapport se montre constant et exactement égal à $\frac{1}{2}$ jusqu'à 2^{mm} de pression; en deçà, le pouvoir refroidissant de l'acide sulfureux se rap-

proche de celui de l'air, et l'expérience le donne même un peu plus grand aux très basses pressions.

Avec l'hydrogène on a obtenu, dans les mêmes conditions, les résultats suivants :

TABLEAU XIII.

Pressions.	Ordonnées.	Rapports.
mm		
300	68000	4,96
100	60300	5,24
50	56800	5,50
10	45700	5,34
5	36600	4,52
3	30400	3,84
2	24700	3,34
1	15500	2,71
0,5	8300	2,08
0,1	2000	1,50
0,05	800	1,03

Ici encore, le pouvoir refroidissant du gaz se rapproche, aux basses pressions, de celui de l'air.

La première pensée qui se présente est que l'appareil devait, à mesure qu'on y faisait le vide, laisser rentrer de l'air qui se substituait peu à peu au gaz introduit au début; mais il est difficile d'admettre une semblable cause d'erreur avec un appareil dans lequel on a pu, en y faisant le vide du 21 septembre au 4 octobre, abaisser la pression jusqu'à $0^{\text{mm}},001$, et cela avec des temps d'arrêt de plusieurs heures pendant lesquels on ne constatait aucune perte.

On refit, cependant, dans l'hydrogène, une série d'observations avec le fil de $\frac{1}{20}$ de millimètre. Le gaz fut préparé avec un soin tout particulier. Outre l'acide phosphorique anhydre que renfermait déjà l'appareil à faire le vide, on plaça dans le flacon des fragments de potasse fondue pour absorber l'acide carbonique que le mastic aurait pu dégager. Le gaz extrait par la trompe entre les pressions $1^{\text{mm}},5$ et $0,1$ fut recueilli dans un tube divisé et mesuré sur la cuve à eau; on trouva

On introduisit dans le tube un fragment de potasse; après agitation, on lut

143^{div.}

On ajouta une dissolution d'acide pyrogallique, et, après agitation, on trouva

144^{div.}

L'analyse ne décelait donc de quantités sensibles ni d'acide carbonique ni d'oxygène; de plus, le gaz brûlait avec la flamme caractéristique de l'hydrogène.

La série d'observations avait duré du 19 au 30 décembre; à cette dernière date, la pression était 0^{mm},001; l'appareil, abandonné jusqu'au 19 février, accusa alors une pression de 0,014; la perte par jour était insignifiante. Les expériences semblaient donc avoir été faites dans de bonnes conditions. Or les résultats sont indiqués dans le Tableau suivant, presque identique au précédent :

TABLEAU XIV.

Pressions. mm	Pouvoir refroidissant relatif.
300	5,10
100	5,23
50	5,35
10	4,43
5	3,93
3	3,77
2	3,15
1	2,41
0,5	1,76
0,3	1,48

Sans oser affirmer qu'un fait aussi remarquable que l'identité du pouvoir refroidissant des différents gaz aux basses pressions n'ait pas besoin d'être confirmé par de nouvelles expériences, nous rapprochons de la variation observée dans la valeur de ce pouvoir refroidissant

de l'hydrogène la diversité des nombres donnés par différents expérimentateurs :

Kundt et Warburg	7,1
Winkelmann	6,3
Narr	5,51
Dulong et Petit	3,45