

---

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR

# LE RAYONNEMENT,

PAR M. P. GARBE,

Chargé de cours à la Faculté des Sciences de Poitiers.

---

## INTRODUCTION.

Lorsqu'un corps solide, placé dans le vide, est porté à des températures graduellement croissantes, l'énergie rayonnée par ce corps va en augmentant, et en même temps la nature du flux rayonné se modifie. Draper (1) et, après lui, d'autres physiciens ont montré, en effet, qu'à mesure que le corps s'échauffe et pendant que les radiations qui composent son rayonnement augmentent de plus en plus d'intensité, de nouvelles radiations apparaissent en suivant l'ordre des réfrangibilités croissantes. Le problème du rayonnement contient donc, comme facteurs, trois quantités qu'il y a lieu de considérer comme intimement liées les unes aux autres : la température du corps, l'énergie totale rayonnée et l'intensité de chaque radiation dans ce flux total.

Depuis Newton et surtout après les remarquables travaux de Dulong et Petit, on a spécialement donné le nom de *loi du rayonnement* à la relation qui existe entre les deux premières de ces quantités, et les efforts de presque tous les physiciens qui se sont occupés de cette question se sont portés sur l'établissement de cette loi. La formule donnée par Newton,  $R = ma^t$ , n'a pas tardé à être reconnue inexacte pour des excès de température un peu notables; elle a été remplacée par celle de Dulong et Petit,  $R = ma^{\theta}(a^t - 1)$ ,

---

(1) *Philosophical Magazine*, t. XXX; 1847.

qui, en introduisant comme facteur la température  $\theta$  de l'enceinte, s'accorde avec l'expérience tant que l'excès  $t$  ne dépasse pas  $300^{\circ}$  environ. Au delà de cette limite, cette loi elle-même a été reconnue inexacte par plusieurs expérimentateurs et récemment par M. Rivière (<sup>1</sup>), dont les résultats, obtenus pour des excès de température qui vont jusqu'à  $1000^{\circ}$ , n'ont pas été traduits en formule.

D'autres relations ont été substituées à celle de Dulong et Petit.

D'après M. Stefan (<sup>2</sup>), si l'on désigne par  $T$  la température absolue du corps, par  $t$  celle de l'enceinte dans laquelle il se refroidit, le rayonnement dans le vide est donné par la formule

$$R = A(T^4 - t^4),$$

c'est-à-dire que le rayonnement absolu d'un corps est proportionnel à la quatrième puissance de sa température absolue. Cette loi rend parfaitement compte des résultats de Dulong et Petit et s'accorde surtout avec ceux obtenus par de La Provostaye et Desains; mais les expériences de M. Rivière et celles plus récentes de M. Schleiermacher (<sup>3</sup>) montrent qu'aux températures élevées elle s'écarte de l'observation en sens inverse de la loi de Dulong et Petit, c'est-à-dire que le coefficient  $A$ , au lieu de demeurer constant, devrait aller en augmentant avec la température. Faut-il rejeter, de ce chef, la loi de Stefan, ou bien devons-nous admettre que  $A$  varie, en effet, avec la température? D'après la loi de Kirchhoff,  $A$  est une quantité proportionnelle au pouvoir absorbant du corps à la température considérée; or, si la constance de cette quantité caractérise un corps parfaitement noir, il faut reconnaître que la plupart des substances sont loin de satisfaire à cette condition et que, pour le platine, en particulier, cette quantité augmente de plus du double de sa valeur de  $100^{\circ}$  à  $1000^{\circ}$  (<sup>4</sup>).

D'ailleurs il est à remarquer que cette loi de Stefan vient de trouver un appui considérable dans les recherches théoriques de M. Boltzmann (<sup>5</sup>). Ce savant, en appliquant, après M. Bartholi, au rayonnement calorifique le second principe de la Thermodynamique et en combinant les résultats ainsi

(<sup>1</sup>) *Annales de l'École Normale*; 1884.

(<sup>2</sup>) *Wien. Ber.*, 79 (II), p. 391; 1879.

(<sup>3</sup>) *Wiedemann's Annalen*, Bd. 26, S. 237.

(<sup>4</sup>) NICHOLS, *Ref. in Beibl.*, 3, p. 864; 1879.

(<sup>5</sup>) *Wiedemann's Annalen*, Bd. 22, S. 291.

obtenus avec d'autres fournis par la théorie électromagnétique de la lumière, est arrivé précisément à la relation de Stefan. Il y a là plus qu'un hasard heureux, et il est permis de penser que cette loi pourra être vérifiée expérimentalement si l'on opère avec un corps se rapprochant plus que le platine du corps noir absolu et à des températures assez élevées pour que les corrections, toujours incertaines, relatives à l'enceinte, puissent être négligées sans erreur appréciable.

Une seconde relation doit exister entre la température du corps et l'intensité d'une radiation simple constitutive du rayonnement, et il est clair que la connaissance de cette loi entraînerait, par une intégration relative à la longueur d'onde, la connaissance de la première. Aussi a-t-elle été l'objet d'un certain nombre de recherches qui ont surtout porté sur les radiations lumineuses, lesquelles sont plus facilement accessibles à l'expérience. M. E. Becquerel, dans un travail considérable sur l'irradiation des corps incandescents <sup>(1)</sup>, a trouvé que l'intensité des radiations rouge, verte et bleue, transmises par des verres colorés, varie avec la température suivant une loi exponentielle analogue à celle de Dulong et Petit

$$r = a(e^{b(T-\theta)} - 1),$$

dans laquelle  $\theta$  désigne la température à laquelle prennent naissance les radiations considérées,  $e$  la base des logarithmes adoptés,  $b$  représentant ainsi le logarithme de la base des exponentielles, lequel, d'après les expériences, semble varier en raison inverse des longueurs d'onde.

Dans une série d'expériences effectuées dans ces dernières années, M. Violle <sup>(2)</sup> a repris la question à ce même point de vue, et il a trouvé que la radiation du platine incandescent dans l'air pouvait s'exprimer par la formule

$$r = m T b T^2 a^T,$$

dans laquelle  $T$  est la température absolue du corps,  $b$  une constante,  $a$  une fonction du premier degré de la longueur d'onde et qui s'annule pour  $\lambda_1 = 0^{\text{mm}}$ , 1 environ et  $m$  un coefficient fonction de la longueur d'onde qui, dans un flux total, peut servir à caractériser l'intensité calorifique relative de chaque radiation. Par conséquent, à une température  $T$ , le flux total

<sup>(1)</sup> *Annales de Chimie et de Physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LXVIII; 1863.

<sup>(2)</sup> *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XCII, p. 1206.

peut être représenté par l'intégrale

$$R = T b T^3 \int_0^{\lambda_1} m a^T d\lambda,$$

dans laquelle  $m$  est une quantité qui reste à déterminer pour chaque valeur de  $\lambda$ .

Est-il permis d'admettre, avec M. Christiansen (1), que la loi de Stefan, supposée vraie pour le flux total, s'applique à chaque radiation simple, c'est-à-dire que l'intensité de ce flux puisse être mise sous la forme

$$T^4 \int_0^{\infty} \varphi(\lambda) d\lambda?$$

Ce serait admettre que l'intensité relative des diverses radiations se maintient dans toute l'échelle des températures; en d'autres termes, que la composition du flux n'éprouve aucune modification lorsque la température change. Or les expériences de Draper, celles de M. E. Becquerel, les résultats précédemment cités de M. Violle et enfin ceux du présent travail montrent qu'une telle supposition est inadmissible.

Il existe donc, dans le flux total, une loi de variation propre à chaque espèce de radiations : c'est le troisième point de vue auquel on peut se placer pour envisager le problème du rayonnement.

En s'affranchissant ainsi de la considération de température, on élimine une grandeur qui, par son évaluation toujours très délicate aux termes élevés de l'incandescence du corps, impossible même au delà de la température où la porcelaine se ramollit, augmente, dans le premier cas, la difficulté des observations et s'oppose, dans le second, à ce qu'elles soient poussées jusqu'à ces limites où il est si intéressant de pouvoir suivre le phénomène. Il est clair, d'ailleurs, que, cette relation une fois trouvée, il sera possible d'en déduire la loi de variation d'une radiation avec la température, si l'on admet connue la première loi. En effet, des relations

$$\begin{aligned} R &= \chi(T), \\ r &= \psi(R, \lambda), \\ r &= \varphi(\lambda, T). \end{aligned}$$

on déduira

---

(1) *Wiedemann's Annalen*, Bd. 49, S. 268.

En particulier, si l'on considère, pour une température  $T$ , deux radiations de longueurs d'onde  $\lambda_1, \lambda_2$ , on aura

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{\varphi(\lambda_2, T)}{\varphi(\lambda_1, T)},$$

et cette dernière relation pourra servir à définir la température  $T$ , d'après la loi supposée exacte à toute température  $R = \chi(T)$  et jusqu'aux températures les plus élevées qui auront été atteintes dans les expériences de détermination de la fonction  $\psi$ .

Les résultats obtenus sur ce point sont peu nombreux : les expériences de Draper (1) sur un fil de platine rendu incandescent, dans l'air, par le passage d'un courant; celles de Zöllner (2), dans lesquelles on compare l'effet calorifique à l'action lumineuse totale, n'ont trait que d'une manière indirecte au sujet actuel. M. E. Becquerel, dans le travail déjà mentionné, s'est occupé incidemment de cette question, et il arrive à la conclusion suivante : « Si l'on compare la quantité  $M$  de chaleur émise dans l'unité de temps à l'intensité de la lumière émise par un rayon de couleur homogène, on reconnaît qu'à partir de la limite de  $480^\circ$  à  $490^\circ$ , à laquelle les rayons lumineux commencent à être émis, l'intensité lumineuse des rayons rouges croît beaucoup plus rapidement que la quantité de chaleur, sans qu'il y ait aucune loi simple qui lie ces deux quantités l'une à l'autre. Entre les limites des expériences, et si l'on nomme  $m$  la quantité de chaleur rayonnée au moment où le corps devient lumineux, on aura sensiblement

$$I = B(M - m)^3,$$

$B$  étant un coefficient constant. »

La longueur d'onde moyenne du verre rouge employé par M. E. Becquerel était d'environ  $0^{\mu},670$  et le rayonnement total était donné par une pile thermo-électrique placée dans le vide en même temps que la source incandescente.

Nous aurons l'occasion de revenir sur ces déterminations qui, bien qu'incomplètes, puisqu'elles ne portent que sur une radiation ou plutôt sur un ensemble de radiations transmises par le verre rouge, ont cependant conduit leur auteur à un type de formule qui, sauf les modifications que nous indi-

(1) *Loc. cit.*

(2) *Photometrische Untersuchungen* (Basel; 1859).

querons dans la suite, paraît représenter le phénomène à tous les degrés d'incandescence du corps.

Dans ces derniers temps, l'apparition des lampes à incandescence a forcément ramené l'attention et les recherches sur le rapport qui pouvait exister entre l'énergie électrique dépensée dans ces lampes et leur pouvoir lumineux; toutefois les expériences qui ont été faites dans cette voie s'éloignent, par leur caractère particulièrement pratique, de l'ordre d'idées suivi dans ce travail. C'est ainsi que M. le Dr Voit représente par la formule  $L = aA^3$  la relation entre l'énergie  $A$  et l'intensité lumineuse totale  $L$ . M. Goëtz<sup>(1)</sup>, dans une étude sur les lampes Crutto, remplace cette formule par la suivante :  $L = aA + bA^2$ . Cette dernière formule est appliquée par M. Shumann<sup>(2)</sup> aux radiations simples; mais si, au point de vue pratique, elle peut être considérée comme suffisamment exacte, du moins pour les degrés élevés d'incandescence, il est clair qu'elle est peu propre à mettre en évidence les propriétés particulières à chaque radiation dans le phénomène du rayonnement.

Ce travail a été fait au laboratoire de Physique de la Faculté des Sciences de Montpellier. M. Crova a mis avec empressement à ma disposition les ressources de son laboratoire et jusqu'à ses appareils particuliers de recherche : je suis heureux de pouvoir l'en remercier ici.

---

(1) *Centralblatt für Electrotechnik*, n° 33.

(2) *Electrotechnische Zeitschrift*; mai 1884.

## PREMIÈRE PARTIE.

MÉTHODE EXPÉRIMENTALE. — MESURES ÉLECTRIQUES. — DÉTERMINATIONS  
PHOTOMÉTRIQUES. — DISPOSITION GÉNÉRALE DES APPAREILS.

---

### I. — MÉTHODE EXPÉRIMENTALE.

Draper, M. E. Becquerel et M. Zöllner ont employé, comme corps incandescent, un fil de platine porté à des températures de plus en plus élevées par le passage d'un courant. On a préféré, dans les recherches qui vont suivre, prendre le filament de charbon tel qu'il se trouve disposé dans les lampes à incandescence. Le charbon étant un corps noir et mat à l'état ordinaire, on peut espérer que les propriétés de sa surface resteront les mêmes à tous les degrés d'incandescence et qu'ainsi le phénomène du rayonnement ne se compliquera pas d'une variation dans le pouvoir émissif aux différentes températures. En outre, le phénomène pourra être suivi jusqu'à des températures bien supérieures à celle de la fusion du platine. Enfin, le charbon étant moins bon conducteur de la chaleur que les métaux, l'influence refroidissante des points d'attache du filament est beaucoup moins considérable qu'avec le platine et devient négligeable pour des filaments de quelques centimètres de longueur seulement. Ces lampes, ou du moins certains types d'entre elles, sont d'ailleurs immédiatement disposées pour l'expérience, puisque le vide y a été fait, préalablement, avec le plus grand soin, au moment de leur construction.

La méthode employée consiste à évaluer le rayonnement total par le travail électrique dépensé dans la lampe et à déterminer au spectrophotomètre l'intensité lumineuse d'une radiation par rapport à l'intensité de cette même radiation dans une source auxiliaire supposée constante. M. E. Becquerel, dans le travail cité précédemment, a préféré mesurer le rayonnement par l'intensité du courant développé dans une pile thermo-électrique soumise à ce rayonnement. Il a eu soin, d'ailleurs, de vérifier préalablement la proportionnalité entre cette intensité et le travail électrique évalué directement.

Aujourd'hui, que les appareils de mesures électriques permettent d'obtenir avec une grande approximation les éléments de ce travail, il m'a paru plus exact, sinon plus rapide, de mesurer, pour chaque état de la lampe, l'intensité du courant qui la traverse et la différence des potentiels à ses bornes. Du produit de ces deux quantités on déduit, par la loi de Joule, la quantité de chaleur dégagée dans le filament pendant l'unité de temps. Il faut remarquer, toutefois, que cette relation fondamentale n'a été établie expérimentalement par Joule et vérifiée ensuite par Lenz que dans le cas où le fil traversé par le courant, étant placé au contact du liquide du calorimètre, dont la température s'élevait peu, ne devenait jamais incandescent. Il était donc utile de faire, au préalable, cette vérification sur un fil librement incandescent comme il doit l'être dans les expériences de rayonnement et en se servant des appareils calorimétriques auxquels on peut accorder le plus de confiance.

*Vérification de la loi de Joule dans le cas des fils incandescents.*

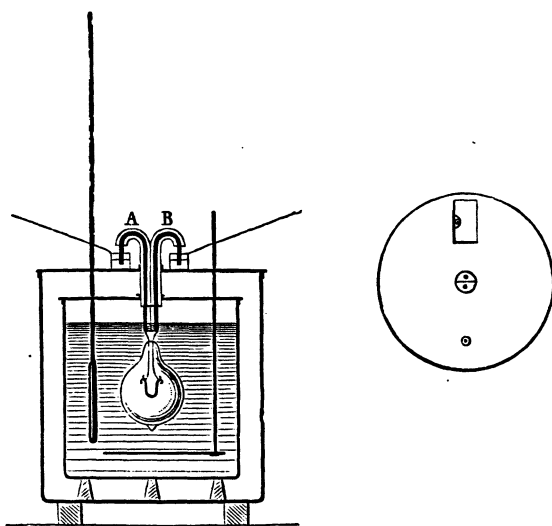
Le calorimètre employé est celui de M. Berthelot : il est en platine, d'une contenance de 600<sup>cc</sup> environ, protégé contre le refroidissement par un premier vase métallique et une enceinte extérieure remplie d'eau. Deux thermomètres Baudin, donnant le  $\frac{1}{50}$  de degré par division de 0<sup>m</sup>,001 environ, plongent, l'un dans l'enceinte extérieure dont la température ne doit varier que très peu dans l'intervalle de temps d'une expérience, l'autre dans le calorimètre par l'ouverture rectangulaire du couvercle.

La lampe à incandescence sur laquelle on opère est suspendue au sein du calorimètre par deux gros fils de cuivre recouverts de gutta, qui traversent ensemble les ouvertures centrales des couvercles et viennent plonger, à leur sortie, dans deux godets A, B (*fig. 1*) remplis de mercure où aboutissent également les fils de l'électromètre. Deux autres godets, situés en face des premiers, reçoivent les fils conducteurs du courant, assez gros pour ne pas s'échauffer pendant l'expérience. Les mesures électriques d'intensité et de différence de potentiel sont faites avec les appareils dont la description trouvera sa place plus loin. Le calorimètre avait été d'abord rempli d'eau distillée, en vue de mesures absolues ; mais on s'est aperçu que, pour de fortes intensités du courant, des traces d'électrolyse se manifestaient entre les fils voisins de la lampe à incandescence et l'on a dû employer un liquide plus isolant. L'alcool à 95° isole parfaitement dans ces conditions et n'est pas



assez hygrométrique pour troubler les expériences. Sa chaleur spécifique n'est pas connue exactement, il est vrai ; mais cette donnée est inutile, du

Fig. 1.



moment qu'il n'est besoin d'obtenir que les quantités relatives de chaleur dégagées. L'appareil calorimétrique était placé dans une chambre presque obscure, sans fenêtres et ne recevant le soleil d'aucun côté.

Les expériences étaient faites le matin : de cette façon l'équilibre de température avait eu le temps de s'établir pendant la nuit entre les différentes parties de l'appareil. D'après la nature du phénomène calorifique à mesurer, il semblait naturel d'appliquer la méthode de compensation de Rumford, en portant d'abord l'eau de l'enceinte extérieure à une température supérieure de  $1^{\circ}$  environ à celle du calorimètre, puis en faisant passer le courant dans la lampe jusqu'à ce que la température du calorimètre fût de  $1^{\circ}$  au-dessus de celle de l'enceinte ; mais ici, comme dans la plupart des cas, ainsi que l'a montré M. Berthelot, ce mode de correction est illusoire. D'abord, en disposant ainsi de la température initiale, on trouble l'état d'équilibre dont il vient d'être parlé et que l'expérience montre être si propice à l'exactitude des déterminations. En outre, malgré l'agitation du liquide du calorimètre, la température ne cesse pas brusquement de monter aussitôt après la rupture du courant, et, par suite, la marche ascendante des températures dans le calorimètre ne peut être arrêtée à volonté à une valeur fixée d'avance. Enfin il a semblé qu'une méthode de correction basée sur la loi du rayon-

nement ne pouvait s'appliquer en toute rigueur au système complexe formé par le calorimètre et l'enceinte extérieure séparés par deux couches d'air et une cloison métallique. En se plaçant, au contraire, dans les conditions indiquées par M. Berthelot et en ayant soin que l'élévation de température du calorimètre ne dépasse pas  $2^{\circ}$ , la correction de rayonnement est insignifiante et le seul refroidissement qu'éprouve le liquide est dû à la faible évaporation de l'alcool par suite de l'échauffement et de l'agitation. Pour tenir compte de ce refroidissement qui, bien que faible, n'est cependant pas négligeable, on a divisé la durée d'une expérience en deux périodes : l'une d'échauffement rapide correspondant au passage du courant dans la lampe, l'autre d'échauffement lent suivi de refroidissement.

On a appliqué à la première la moyenne des corrections initiale et finale et à la seconde la correction finale. Le Tableau suivant donne la marche et les résultats d'une expérience :

## Expériences du 4 février 1884.

	Heure du chronomètre.	Températures.		Galvano- mètre.	Électro- mètre.
		Enceinte.	Calorimètre.		
	<sup>h</sup> <sup>m</sup> 8.26	<sup>o</sup> 11,25	<sup>o</sup> 11,29	} correct. initiale : 0°,000	217,9
Départ .....	30	»	11,29		
	31	»	11,65	} 405,3	59,6
	32	»	»		
Arrêt .....	33	»	12,80	} 217,1	
	34	»	87		
	35	»	89	} correct. finale : 0°,006	
	36	»	89		
	37	»	883		
	38	»	880		
	39	»	875		
	40	»	870	} 0°,006	
	42	11,28	12,858		

On voit par ce Tableau que la température de l'enceinte extérieure n'a varié que d'une façon insignifiante pendant la durée assez longue d'une expérience complète, et que cette variation ne peut avoir aucune influence sur la température du calorimètre, puisque, à l'origine, cette dernière restait fixe alors qu'il existait une différence de  $0^{\circ},04$  entre elle et la température de l'enceinte.

L'électromètre employé était celui de M. Lippmann et son indication

correspond à une force électromotrice de  $0^{\text{dii}},228$  ; il était relié aux bornes de la lampe à travers  $5^{\text{dii}}$ , de sorte que la différence de potentiel aux bornes est de  $5^{\text{dii}},228$ . Le calcul de l'expérience se fait de la façon suivante, en rapportant l'échauffement du calorimètre à ce qu'il serait si le courant avait traversé la lampe pendant dix minutes :

Déviatiou du galvanomètre.....	$\delta = 187,8$	
Différence de potentiel.....	$e = 5^{\text{dii}},228$	
Correction moyenne pour $3^{\text{m}}$ .....	$0,009$	} $0,051$
» finale » $7^{\text{m}}$ .....	$0,042$	
Température à $8^{\text{h}} 40$ (lue).....		$12,870$
» (corrigée).....		$12,921$
Élévation de température pour $3^{\text{m}}$ de passage....	$12^{\circ},921 - 11^{\circ},290 = 1^{\circ},631$	
» $10^{\text{m}}$ » .....	$\theta = 1,631 \times \frac{10}{3} = 5^{\circ},443$	

$$\text{Rapport... } \frac{\delta e}{\theta} = 180,7.$$

En faisant varier l'intensité du courant et en même temps la durée du passage, on a obtenu les résultats suivants :

$\delta$ .	$e$ .	$\theta$ .	$\frac{\delta e}{\theta}$ .	Aspect du filament.
39	1,49	0,323	179,9	Complètement obscur.
140,5	4,083	3,189	179,8	Rouge sombre.
187,8	5,228	5,433	180,7	» vif.
231,4	6,25	8,02	180,3	Blanc éblouissant.

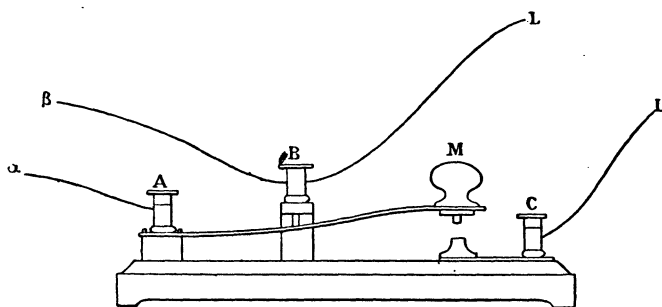
On voit, par ces nombres, que le rapport de l'énergie électrique dépensée à la quantité de chaleur dégagée au sein du calorimètre est constant. Cette chaleur représente l'énergie totale rayonnée, puisque la lampe est à l'intérieur d'un vase clos et opaque et que, par suite, toutes les radiations émises par le charbon sont retenues et absorbées dans l'appareil calorimétrique. La lampe qui a servi à ces expériences fonctionnait régulièrement avec  $6^{\text{volts}}$  de différence de potentiel aux bornes ; elle a donc été surmenée dans les déterminations précédentes, et la vérification se trouve ainsi poussée jusqu'au terme le plus élevé de l'incandescence du filament de charbon, c'est-à-dire à un point où, comme on s'en est assuré au spectrophotomètre, la température optique de la lampe à incandescence est bien supérieure à celle du carcel.

## II. — MESURES ÉLECTRIQUES.

*Mesure de la différence de potentiel.*

1° *Électromètre de M. Lippmann.* — La première partie des déterminations a été faite au moyen de l'électromètre de M. Lippmann, auquel on a pu substituer dans la suite l'électromètre Thomson, modifié par M. Mascart. J'indiquerai ici la manière dont ces deux appareils ont été employés. L'électromètre capillaire, fixé sur un support en bois, était solidement installé contre un des murs de la salle; l'extrémité supérieure du tube était mastiquée à l'une des branches d'un robinet en verre à trois voies dont la seconde branche était mastiquée au manomètre à mercure, tandis que la troisième correspondait à la poire en caoutchouc qui donnait la pression compensatrice. L'emploi de ce robinet permettait de séparer à un moment donné le tube de l'électromètre de la poire, pour le laisser seulement en communication avec le manomètre, et de conserver ainsi une pression invariable dans l'appareil. Les deux fils de l'électromètre venaient aboutir aux bornes d'une clef à trois prises A, B, C (*fig. 2*). Dans l'état de repos, les fils  $\alpha$ ,  $\beta$  sont en

Fig. 2.



contact et l'électromètre fermé sur lui-même; en appuyant sur la manette M, on relie les fils  $\alpha$ ,  $\beta$  aux bornes L, L' de la lampe. Sur le trajet des fils BL ou CL' se trouvaient placés en opposition de petits éléments Daniell en nombre suffisant pour que la différence de potentiel à l'électromètre fût inférieure à 1<sup>mm</sup>. Un commutateur placé sur le trajet des fils A $\alpha$ , B $\beta$  permettait même de rendre cette différence inférieure à 0<sup>mm</sup>,5 tout en conservant la polarisation par l'hydrogène dans le tube capillaire. Pour construire la courbe de graduation de cet appareil, on aurait pu s'adresser à la courbe donnée par M. Lippmann et déterminer la pression compensatrice correspondant au

daniell ; mais l'emploi de cette courbe type suppose que l'on a satisfait à deux conditions : d'abord, l'identité du daniell employé avec celui qui a servi aux expériences de M. Lippmann, et l'on sait que cette identité n'est pas facile à obtenir en toute rigueur ; et en outre l'emploi, dans l'électromètre, d'un acide de même concentration. Les électromètres à mercure ne sont, en effet, comparables que pour une même concentration de l'acide, ainsi qu'on peut le voir de la façon suivante. Soit  $x_0$  la différence électrique au contact entre le mercure et l'eau acidulée, c'est-à-dire celle qui existe au ménisque lorsque l'appareil est fermé sur lui-même ; soit  $e$  la force électromotrice variable interposée sur le trajet des fils de l'électromètre : la différence électrique au ménisque est alors

$$\delta = x_0 + e.$$

Pour une valeur  $e_m$  de  $e$ , la pression compensatrice passe par un maximum correspondant à une différence électrique

$$\Delta = x_0 + e_m.$$

Cette différence électrique, ainsi que l'a montré M. Lippmann, est constante quel que soit le liquide employé ; donc, pour un autre liquide dont la différence au contact du mercure est  $x'_0$ , le maximum de pression compensatrice s'obtiendra pour une valeur  $e'_m$  de  $e$  différente de la première et satisfaisant à la relation

$$\Delta = x'_0 + e'_m.$$

Puisque, vraisemblablement, les valeurs de  $x_0$  dépendent de la concentration, il faut s'attendre à ce que l'expérience donnera pour  $e_m$  des valeurs différentes et, par suite, les deux électromètres ainsi formés avec deux liquides distincts ne seront pas comparables. C'est d'ailleurs ce que montre le Tableau suivant, où D désigne la valeur en volts du daniell employé :

	Liquide.	$\frac{e_m}{D}$ .
Eau acidulée au .....	$\frac{1}{5}$	0,833
» .....	$\frac{1}{10}$	0,777
» .....	$\frac{1}{20}$	0,723

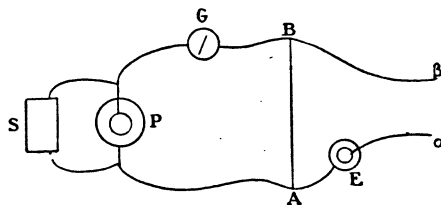
On peut même observer, ainsi que l'a montré M. Helmholtz, et comme j'ai eu l'occasion de le remarquer à propos de ces recherches, que la valeur de  $\Delta$  n'est autre que zéro et que, par suite, les nombres précédents représentent

les différences au contact avec le mercure des liquides employés. Ces considérations suffisent à montrer que les conditions de comparabilité peuvent être difficiles à réaliser rigoureusement. Aussi M. Lippmann conseille-t-il, comme « aussi court et plus direct », de faire à chaque appareil sa graduation. Cette opération ne présente aucune difficulté lorsque l'on possède des boîtes de résistances bien construites. Il suffit, en effet, de placer dans le circuit de un ou deux éléments constants et de force électromotrice connue une résistance fixe et connue  $R$  et une boîte à résistance variable  $\rho$  aux extrémités de laquelle on attache les fils de l'électromètre. Soient  $r$  la résistance de la pile,  $E$  sa force électromotrice ; la différence de potentiel aux deux fils est, à chaque instant,

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

en supposant la résistance totale assez grande pour que ses variations n'influent pas sur la valeur de  $E$ . On peut encore se servir de la disposition élégante de M. Bouty, qui consiste dans l'emploi de deux boîtes de résistances identiques dont l'une est débouchée et l'autre bouchée complètement. A cette dernière aboutissent les fils de l'électromètre et le courant supposé constant traverse les deux boîtes. On enlève successivement des fiches de la seconde boîte pour les placer dans la position correspondante sur la première, de façon à conserver au circuit la même résistance. On a préféré employer la méthode suivante, qui supprime l'usage des boîtes de résistances et par suite leur vérification. Soit  $P$  une pile (*fig. 3*) munie d'un shunt  $S$  et

Fig. 3.



dont le courant traverse un galvanomètre  $G$  et une résistance constante  $AB$  de valeur arbitraire d'ailleurs. En  $A$  et  $B$  aboutissent les fils de l'électromètre, et sur l'un d'eux on place en opposition l'élément  $E$  en fonction duquel on veut graduer l'appareil. Si l'on désigne par  $\varepsilon$  la différence des potentiels en  $A$  et  $B$ , la force électromotrice  $e$  communiquée à l'électromètre sera

$$e = E - \varepsilon.$$

Soient  $r$  la résistance de AB et  $i$  l'intensité du courant qui traverse le galvanomètre ; on a

$$\varepsilon = ri$$

et, par suite,

$$(1) \quad e = E - ri.$$

Augmentons cette intensité, en modifiant le shunt, jusqu'à ce que l'électromètre revienne au zéro, et soit  $I$  l'intensité à cet instant ; nous aurons, en supposant que  $r$  n'ait pas varié,

$$(2) \quad \varepsilon_1 = E = rI.$$

Des équations (1) et (2) on déduit

$$e = E \left( 1 - \frac{i}{I} \right),$$

Ainsi, la valeur de  $e$  s'obtiendra à chaque instant par une lecture au galvanomètre et en fonction de  $E$ . La valeur de  $i$  était donnée par un galvanomètre à réflexion de Weber. La pile P n'a besoin d'être constante que pendant l'intervalle d'une lecture aux deux appareils ; en outre, l'élément d'opposition auquel on rapporte la graduation, ne travaillant que pour charger l'électromètre, peut être formé d'un étalon à grande résistance et à différence de potentiel bien définie. Quant à la variation possible de  $r$  par suite de l'échauffement du fil AB, il est facile de voir qu'elle est absolument négligeable, puisque cette résistance doit être prise assez grande pour qu'un galvanomètre sensible ne dévie que de quelques degrés, sous l'action du courant qui la traverse.

Ce mode de graduation par variation continue de la force électromotrice a permis de mettre en évidence une propriété remarquable de la courbe des pressions compensatrices, qui est d'être symétrique par rapport à l'ordonnée maximum. Toutefois cette symétrie disparaît et la courbe se déforme lorsque cette force électromotrice s'approche de celle qui détermine l'électrolyse persistante de l'eau acidulée. Mais on a vu précédemment que, en diminuant la concentration de l'acide, le maximum se rapprochait de l'origine et, par suite, il était à prévoir que la symétrie, dans ce cas, se manifesterait plus loin au delà de ce maximum. L'expérience est en effet très nette avec l'eau acidulée au  $\frac{1}{10}$ . Après avoir établi dans l'appareil une pression déterminée, on tourne le robinet à trois voies, de façon à mettre en communication seulement le tube capillaire et le manomètre, et, au moyen d'un

rhéostat à mercure et à vis micrométrique de M. Crova, faisant fonction de shunt sur la pile P, on détermine les deux valeurs  $e$ ,  $e'$ , en daniells, de la force électromotrice, qui amènent le ménisque au fil du réticule. Le Tableau suivant donne ces mesures conjuguées et leurs moyennes :

Pression compensatrice en millimètres de mercure.	$e$ .	$e'$ .	$\frac{e+e'}{2}$ .
98,28	0,573	0,981	0,777
104,74	0,689	0,863	0,776
105,16	0,700	0,856	0,778
106,04	0,759	0,796	0,777
106,32 (max.)	0,778	0,778	0,778

Ce caractère de symétrie de la courbe est intéressant, puisque, joint à la relation  $\Delta = 0$ , il entraîne cette conséquence que la valeur de la constante capillaire est indépendante du signe de la différence électrique au ménisque. Au point de vue pratique, il a servi, par une mesure conjuguée, à déterminer, de temps en temps, la position du maximum. Lorsque, par suite de l'évaporation, la concentration de l'acide était modifiée et le maximum déplacé, on enlevait complètement le liquide et on le remplaçait par de l'eau acidulée conservée pour l'usage dans un flacon bien bouché et, par suite, de composition bien déterminée. Mais on ne peut songer à utiliser cette symétrie pour la construction de la courbe, d'abord parce que la portion de cette courbe qu'il est important de tracer avec soin est celle qui correspond aux forces électromotrices inférieures à 0<sup>m</sup>,5 et qu'elle se trouve ainsi en dehors de la partie symétrique, et, en outre, parce qu'il y a intérêt, au point de vue de la sensibilité de l'appareil, à faire usage d'un acide plus concentré que l'acide au  $\frac{1}{10}$ , afin d'éloigner autant que possible le maximum de l'origine.

2° *Électromètre Thomson-Mascart.* — Malgré la facilité de sa construction et la sûreté de ses indications, l'électromètre précédent a été remplacé, dans les mesures, par l'électromètre Thomson-Mascart lorsqu'on a pu l'avoir à sa disposition. Ce dernier offre, en effet, pour ces expériences, où la différence de potentiel n'a pas besoin d'être déterminée avec une extrême précision, l'avantage de donner cette quantité par une simple lecture, au lieu d'une opération toujours un peu longue, puisqu'elle nécessite l'emploi de daniells d'opposition. L'appareil était installé sur une console solidement fixée dans un des angles d'une salle voisine de la salle d'expériences photométriques. Cette console était recouverte d'une cage vitrée sur deux faces et dont l'un des panneaux, en forme de trappe, pouvait être soulevé pour



les lectures. Le toit de la cage porte deux disques d'ébonite au travers desquels passent deux tiges de cuivre munies de vis de serrage à leurs extrémités et, sur la partie de ces tiges extérieure à la cage, glissent deux godets renversés qu'on abaisse en dehors des expériences, pour préserver les disques d'ébonite de la poussière. Les fils qui viennent des bornes de la lampe et qui sont soigneusement isolés du sol aboutissent aux vis extérieures des tiges, tandis que les vis intérieures sont reliées à l'électromètre.

De cette façon l'appareil et sa pile de charge située à l'intérieur de la cage sont, autant que possible, mis à l'abri des poussières de la salle, et leurs différentes parties reçoivent, de ce fait, un isolement plus complet. Les lectures se font, par transparence, sur une règle en celluloïd placée au centre de courbure du miroir.

Une première remarque à faire au sujet de cet appareil, c'est que la position du zéro de l'aiguille n'est pas fixe et est sujette à des variations absolument irrégulières. Ce fait, qui a été constaté par bien des expérimentateurs, tient, sans doute, à plusieurs causes, et, en particulier, au mode d'attache de l'aiguille qui est simplement suspendue au bifilaire par un crochet. En fixant, par une goutte de mastic, ce crochet aux fils de suspension, on rend l'aiguille parfaitement solidaire de ces derniers, et l'on constate que les variations du zéro sont atténuées et disparaissent même complètement lorsqu'on n'exige pas de l'appareil une sensibilité trop grande. Mais alors il faut renoncer à modifier la sensibilité de l'électromètre par l'écartement des brins à leur partie supérieure; dans cette opération, en effet, les fils pourraient se tendre inégalement et l'action du bifilaire perdrait toute régularité. Aussi l'appareil est resté fixe après masticage du crochet et la partie supérieure a été recouverte, tant pour éviter l'introduction de la poussière que pour prévenir tout dérangement accidentel de la vis qui règle l'écartement des brins du bifilaire.

Une autre cause d'erreur résulte de l'emploi des piles de charge formées d'éléments zinc-platine et eau ordinaire. Ces éléments, comme on l'a constaté bien souvent (1), se polarisent avec la plus grande facilité et leur dépolarisation est extrêmement lente : une pile, fermée sur elle-même pendant quelques secondes, ne revient à son état primitif qu'après plusieurs heures et quelquefois davantage. On se rendra compte de la variation considérable de force électromotrice que peuvent subir ces éléments par le Tableau sui-

---

(1) ANGOT, *Électromètres Thomson (Journal de Physique, t. IV, p. 324)*.

vant, où  $\delta_0$  représente la déviation que subit l'aiguille lorsque, l'une des paires de secteurs étant au sol, l'autre paire est reliée à l'aiguille et à l'un des pôles d'une pile de charge de 50 éléments, dont l'autre pôle communique avec le sol :

Date.	$\delta_0$ .
20 décembre 1883.....	81
26       "       .....	212
30       "       .....	227

Le remède consisterait à employer des éléments impolarisables, tels que le Daniell; mais on sait que la diffusion des liquides à travers le vase poreux amène sur le zinc une couche noirâtre dont la présence diminue dans un rapport notable la force électromotrice. Il conviendrait donc d'employer des éléments Daniell, dans lesquels la diffusion serait nulle, par exemple l'élément à grande résistance que M. Crova et moi avons publié sous le nom d'*étalon électrostatique de potentiel* <sup>(1)</sup>; mais il n'a pas été possible de disposer d'un nombre suffisant de ces éléments pour constituer la pile de charge et l'on a dû chercher un autre moyen de se mettre à l'abri des erreurs provenant de la polarisation des éléments ordinaires. Dans la pratique des observatoires ou même des laboratoires, on se borne à étalonner de temps en temps, tous les jours par exemple, l'appareil avec des Daniells fraîchement montés; mais il est clair que, si des contacts accidentels viennent à polariser la pile de charge dans l'intervalle de ces opérations, l'opérateur n'en est pas averti et les expériences se trouvent, par là même, faussées <sup>(2)</sup>. On pourrait supprimer complètement la pile de charge et opérer d'après la méthode de M. Joubert, en réunissant l'aiguille à l'une des paires de secteurs, et alors, en désignant par  $x$  la différence de potentiel des deux paires de secteurs et par  $\alpha^2$  la constante de l'instrument, la déviation  $\delta$  de l'aiguille serait donnée par la formule approchée

$$\delta = \alpha^2 x^2;$$

<sup>(1)</sup> CROVA et GARBE, *Journal de Physique*, 2<sup>e</sup> série, t. III, p. 299.

<sup>(2)</sup> M. Damien, dans une récente Communication (*Annales de Chimie et de Physique*, 6<sup>e</sup> série, t. VI, p. 289), a, de nouveau et très complètement, manifesté cette polarisation des éléments à un seul liquide et les erreurs qui peuvent en résulter dans la pratique de l'électromètre. Au lieu de se borner à étalonner l'appareil de temps en temps, il s'est astreint à le faire après chaque mesure, au moyen d'un élément Latimer-Clark. Cette manière de procéder est certainement la plus sûre de toutes; mais, d'une part, elle nécessite l'usage constant d'un élément supposé invariable et, d'autre part, elle suppose que l'électromètre est réglé à une sensibilité assez grande pour que l'étalonnage puisse se faire sûrement au moyen d'un seul élément.

mais alors on ne peut modifier la sensibilité qu'en agissant sur le bifilaire, ce qui n'est pas possible dans l'appareil fixé comme il a été dit précédemment. De plus, avec cette disposition, qui, d'ailleurs, n'a été employée que dans le cas particulier où la différence de potentiel change de signe un grand nombre de fois par seconde, l'erreur absolue de potentiel correspondant à une erreur déterminée de lecture est proportionnelle à  $\frac{1}{x}$ , de sorte que l'erreur relative, proportionnelle à  $\frac{1}{x^2}$ , va en diminuant avec une extrême rapidité, ce qui peut être considéré comme un désavantage.

Dans la méthode ordinaire d'emploi de l'électromètre, l'erreur absolue est constante et l'erreur relative, proportionnelle à  $\frac{1}{x}$ , diminue plus lentement.

On a trouvé avantageux d'employer ici une méthode qui est une combinaison des deux précédentes en ce sens qu'elle conserve les piles de charge au moyen desquelles on pourra faire varier la sensibilité de l'appareil et qu'en même temps elle s'affranchit de leurs variations. Soit à déterminer la différence  $x$  de potentiel entre deux points dont l'un est supposé mis en communication avec le sol. On amène l'autre point à l'une des paires S de secteurs; à la seconde paire S' et à l'aiguille A aboutit l'un des pôles de la pile de charge de force électromotrice P dont l'autre pôle est relié au sol.

On a, pour exprimer dans ces conditions la déviation  $\delta$  de l'aiguille, la relation

$$(1) \quad \sin \delta = \alpha^2 (P - x)^2.$$

Relions au sol les secteurs S, la déviation  $\delta_0$  devient

$$(2) \quad \sin \delta_0 = \alpha^2 P^2.$$

Des relations (1) et (2) on déduit

$$(3) \quad \sqrt{\sin \delta_0} - \sqrt{\sin \delta} = \alpha x.$$

La constante  $\alpha$  de l'appareil se détermine en mettant en communication avec les secteurs S l'un des pôles d'une pile formée de  $n$  éléments Daniell, de force électromotrice  $e$  supposée connue. La relation (1) devient alors

$$(4) \quad \sin \delta_n = \alpha^2 (P - ne)^2,$$

et des relations (2) et (4) on déduit, pour la valeur de  $\alpha$ ,

$$(5) \quad \alpha = \frac{\sqrt{\sin \delta_0} - \sqrt{\sin \delta_n}}{ne}.$$

On voit, par la relation (3), que, l'appareil une fois jaugé, l'expression de  $x$  est indépendante des variations de  $P$ , pourvu que cette force électromotrice de la pile de charge ne change pas dans l'intervalle des mesures de  $\delta$  et  $\delta_0$ . Si donc on fait une mesure croisée en déterminant successivement  $\delta_0$ ,  $\delta$ ,  $\delta'_0$ , l'appareil indiquera de lui-même si la pile de charge a varié accidentellement. Si la différence entre  $\delta_0$  et  $\delta'_0$  est trop considérable, la mesure sera rejetée; sinon, on prendra pour valeur exacte la moyenne  $\frac{\delta_0 + \delta'_0}{2}$ .

Le Tableau suivant de trois mesures consécutives dans une des déterminations de  $\alpha$  montre l'utilité de cette correction. Dans ce Tableau,  $n_0$ ,  $n'_0$  représentent les divisions de l'échelle :

Ordre des mesures.	$n_0$ .	$n'_0$ .	$\frac{n_0 + n'_0}{2}$ .
I.....	64,4	64,9	64,7
II.....	64,8	65,0	64,9
III.....	65,0	65,0	65,0
IV.....	65,0	65,8	65,4
V.....	65,9	65,7	65,8

On peut remarquer que l'erreur absolue de potentiel correspondant à une erreur donnée de lecture est proportionnelle à  $\frac{1}{P-x}$ ; par suite, l'erreur relative est proportionnelle à  $\frac{1}{x(P-x)}$ , c'est-à-dire qu'elle va d'abord en diminuant jusqu'à la valeur  $x = \frac{P}{2}$ , où elle est minimum, pour croître ensuite; de telle sorte que, pour des valeurs de  $x$  équidistantes de  $\frac{P}{2}$ , l'erreur relative est la même. Elle reste donc sensiblement constante pendant assez longtemps, en admettant toutefois, comme on l'a fait jusqu'ici, que  $x$  et  $P$  soient de même signe.

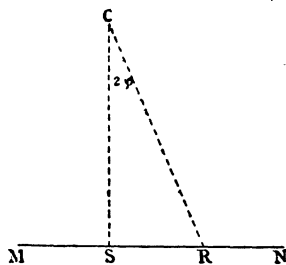
L'inconvénient de cette méthode est que l'action du potentiel  $x$  se produit sur un système déjà dévié, comme si le zéro d'action était à la distance  $\delta_0$  de la position d'équilibre. De là, deux causes d'erreur possibles relatives, l'une à la torsion du bifilaire, l'autre à la position dissymétrique de l'aiguille par rapport aux quadrants, au moment de l'action. Cette dernière n'est

qu'apparente, car on peut tordre préalablement le bifilaire de façon que la déviation  $\delta_0$  due à la pile de charge ramène précisément l'aiguille dans le plan de symétrie de l'appareil. Quant à la première, on ne peut l'éviter ; mais on l'atténue d'abord en rendant, comme on l'a dit,  $x$  et  $P$  de même signe, de façon à avoir  $\delta < \delta_0$  et ensuite en employant la formule complète,

$$\sin \delta = \alpha^2 (P - x)^2.$$

Dans cette formule, et pour des valeurs de  $\delta$  aussi considérables que celles qui se rencontreront forcément avec cette méthode, on ne peut plus songer à exprimer proportionnellement  $\sin \delta$  par le déplacement de l'image sur l'échelle. On a donc dû construire une Table qui donne les valeurs de  $\sin \delta$  ou plutôt de  $\sqrt{\sin \delta}$  correspondant aux différentes positions de cette image. Soit  $C$  (*fig. 4*) la projection de l'axe de suspension de l'aiguille sur un plan

Fig. 4.



perpendiculaire à sa direction et passant par l'échelle  $MN$  et  $S$  la position de l'image du fil sur l'échelle lorsque l'aiguille est symétriquement placée par rapport aux quadrants. Nous supposons qu'alors l'image est dans le plan vertical contenant le fil et que la direction  $MN$  est perpendiculaire à  $CS$ . Soit  $R$  la position de l'image du fil dans l'état de repos de l'appareil. Si l'on désigne par  $\varphi$  l'angle de torsion qui amène l'image de  $R$  en  $S$ , on a

$$\text{tang } 2\varphi = \frac{RS}{CS};$$

et, lorsque l'image occupe une position  $P$  à droite ou à gauche de  $S$ , le nouvel angle  $\varphi'$  dont l'aiguille est déviée sera donné par la relation

$$\text{tang } 2\varphi' = \frac{PS}{CS}.$$

Donc l'angle  $\delta$  de déviation correspondant à la position  $P$  de l'image a

pour expression

$$\delta = \varphi \pm \varphi'.$$

La position R est donnée à l'avance de façon que, sous l'action de la pile de charge seule, l'image vienne se fixer dans le voisinage et à gauche de S :  $\varphi$  est donc immédiatement connu et il ne reste plus qu'à attribuer à P différentes positions correspondant aux différentes divisions N de l'échelle pour calculer les valeurs de  $\varphi'$  et, par suite, les valeurs de  $\delta$  ou de  $\sqrt{\sin \delta}$  au moyen desquelles on formera une Table.

Une dernière opération consiste à étalonner, une fois pour toutes, l'appareil et surtout à vérifier si le rapport  $\frac{\sqrt{\sin \delta_0} - \sqrt{\sin \delta}}{n}$  est indépendant du nombre  $n$  de daniells employés, comme cela doit être si, dans ses déplacements, l'aiguille ne change pas sensiblement de position par rapport aux secteurs. M. Mouton, dans ses expériences sur l'induction, a vérifié que, dans son électromètre dont la boîte était de grandes dimensions, la proportionnalité du moment de torsion à la différence de potentiel se maintenait jusqu'à 1°30' seulement de la position de symétrie. Avec l'électromètre à un seul plan de secteurs, MM. Angot et Branly ont trouvé la proportionnalité jusqu'à 3° environ. Enfin, avec un appareil formé d'une boîte de petites dimensions, M. Benoit (1) l'a vérifiée jusqu'à près de 10°, ainsi que le montre le Tableau suivant :

Angle $\alpha$ .	$\frac{V(V_1 - V_2)}{\sin \alpha}$ .
1.33',2	885
3. 6,7	885
4.41,3	880
6.15,5	881
7.49,0	882
9.20,0	888

Il était donc probable que, avec l'appareil employé ici et la possibilité où l'on était d'opérer de part et d'autre de la ligne de symétrie et à une distance angulaire maximum de 2° de cette ligne, la constance du rapport se maintiendrait. Cette vérification a néanmoins été faite et l'on a déterminé la constante  $\alpha$  de l'appareil par cinq expériences effectuées avec trois valeurs de  $n$  telles que la déviation fût principalement d'un seul côté de la ligne de symétrie :

(1) BENOIT, *Sur l'électromètre à quadrants* (*Journal de Phys.*, 1<sup>re</sup> série, t. VI, p.212).

12 Février 1885.

Pile de charge de 40 éléments. — Zéro de repos à 420. — Ligne de symétrie à 150.

$n.$	$\frac{N_0 + N'_0}{2}$	$\sqrt{\sin \delta_0}$	$N.$	$\sqrt{\sin \delta}$	$\frac{\sqrt{\sin \delta_0} - \sqrt{\sin \delta}}{n}$
10	64,7	0,4267	202,1	0,3329	0,00938
	64,9	4266	202,3	3328	
5	65,0	4266	137,7	3799	0,00934
	65,4	4263	138,0	3796	
7	65,8	4261	165,0	3608	0,00933
Moyenne.....					0,00935

La constance du rapport est donc suffisamment vérifiée. Le nombre 0,00935 représente la valeur de  $\alpha$  correspondante à 1<sup>dl</sup>, c'est-à-dire la valeur de  $\sqrt{\sin \delta}$  qu'on obtiendrait par la méthode de M. Joubert avec un élément daniell sur l'une des paires de secteurs et l'aiguille. Si l'on veut exprimer les potentiels en volts, on remplacera  $\alpha$  par l'expression  $\frac{0,00935}{e}$  dans la formule générale,  $e$  étant la valeur du daniell en volts :

$$x = \frac{e}{0,00935} (\sqrt{\sin \delta_0} - \sqrt{\sin \delta}).$$

Dans les mesures relatives, on prendra pour valeur de  $x$  l'expression

$$\sqrt{\sin \delta_0} - \sqrt{\sin \delta}.$$

*Mesure de l'intensité du courant.*

La mesure de l'intensité du courant qui traverse la lampe à incandescence se faisait au moyen d'un excellent galvanomètre de Weber, muni d'un shunt au  $\frac{1}{100}$  environ et mis en dérivation sur le courant principal. Les déviations du barreau étaient lues par réflexion au moyen d'une lunette sur une échelle divisée, placée à une distance de 2<sup>m</sup> environ de l'appareil. La proportionnalité des intensités aux déviations lues sur l'échelle a été vérifiée par les expériences suivantes qui ont servi en même temps à graduer l'appareil en unités absolues. On a fait passer dans l'appareil, muni du shunt, le courant d'éléments sensiblement constants et noté la déviation correspondante. En même temps le courant traverse un voltamètre à sulfate de cuivre et l'on estimait le poids de cuivre déposé pendant le temps de passage

du courant. On en déduisait la valeur  $i$  en ampères du courant capable de produire une déviation de  $1^{\text{div}}$  de l'échelle. En répétant cette expérience pour deux valeurs différentes et assez grandes de l'intensité, on devait, si la proportionnalité se vérifie jusqu'à ces limites, trouver le même nombre pour exprimer ce courant correspondant à  $1^{\text{div}}$ . On a préféré, d'après les conseils de M. Crova, le sulfate de cuivre aux sels d'argent, malgré l'inégale variation de poids des deux lames, positive et négative, pendant l'électrolyse du cuivre, signalée par M. Mascart (1); d'abord parce que cette différence est assez faible et qu'il suffit, pour éviter toute erreur, de prendre la variation de poids de la lame négative; en outre, parce que l'argent, pour de faibles densités du courant, a l'inconvénient de se déposer sur la cathode en aiguilles cristallines qui se détachent avec la plus grande facilité. Le cuivre, au contraire, est remarquable par la beauté de son dépôt galvanoplastique.

Le courant employé pour l'électrolyse n'est généralement pas constant pendant la durée assez longue d'une expérience. On peut essayer de maintenir l'image immobile au moyen d'un rhéostat intercalé dans le circuit; mais, outre que cette opération est toujours fort délicate, elle est le plus souvent illusoire à cause des variations de zéro que subissent d'une façon continue les galvanomètres. Il est donc préférable de noter, de temps en temps, le zéro et la position et de prendre pour déviation, pendant l'intervalle de deux observations, la moyenne des déviations ainsi observées. En multipliant ce nombre par le temps exprimé en secondes et faisant la somme  $\Sigma$  des produits analogues pour tous les intervalles, on aura la formule suivante, où  $x$  représente la valeur en ampères du courant qui déplace le fil de  $1^{\text{div}}$ ,

$$x \times 0,3285 \times \Sigma = p,$$

$p$  étant le poids de cuivre déposé exprimé en milligrammes.

Le nombre 0,3285 qui représente, pour le cuivre, l'action chimique d'un ampère par seconde ou d'un coulomb, a été déduit du nombre 1,1156 donné, pour l'argent, par M. Mascart (2), en prenant pour équivalents respectifs de ces deux métaux :

Ag.....	107,93
Cu.....	31,78

(1) MASCART, *Journal de Physique*, 1<sup>re</sup> série, t. I, p. 112.

(2) *Ibid.*, 2<sup>e</sup> série, t. III, p. 286.



Le Tableau suivant résume les résultats d'une expérience où le courant était fourni par un accumulateur du genre Planté :

2 Janvier 1885.

Durée de passage en minutes : $\theta$ .	Déviatiou moyenne en divisions : $n$ .	Produit $\theta \times n$ .
15	134,3	2014,5
20	135,6	2712,0
20	136,4	2728,0
20	137,9	2758,0
20	143,0	2860,0
30	144,0	4320,0
		<hr/> 17392,5

d'où

$$\Sigma = 17392,5 \times 60 = 1043550.$$

Variation de poids de la lame négative :

$$p = 35^{\text{mg}},9.$$

On en déduit

$$x = \frac{35,9}{1043550 \times 0,3285} = 0^{\text{amp}},0001047.$$

La même expérience, faite une année auparavant (10 décembre 1883), avec un élément Daniell en place de l'accumulateur, avait donné les résultats suivants :

Déviatiou moyenne.	$\Sigma$ .	$p$ .
165	782380	26,9

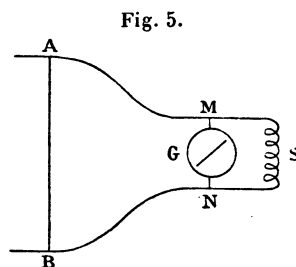
d'où

$$x = \frac{26,9}{782380 \times 0,3285} = 0^{\text{amp}},0001046.$$

La concordance absolue de ces deux nombres montre, d'abord, que la valeur en ampères d'une division est indépendante de la déviatiou moyenne qui a servi à la déterminer et que, par suite, les intensités sont proportionnelles aux déviations. Elle montre, en outre, que l'appareil est resté identique à lui-même pendant toute la durée des expériences.

Pour déduire de ce nombre la connaissance, en valeur absolue, de l'intensité du courant qui traverse la lampe, il était nécessaire de déterminer les éléments de la dérivation. Le courant principal, après avoir traversé la lampe, arrive aux deux extrémités AB (*fig. 5*) d'un fil de cuivre de 1<sup>m</sup> de

longueur et de 1<sup>mm</sup> de diamètre environ. Des points A et B partent les fils de cuivre qui vont au galvanomètre G muni du shunt précédent, également



en cuivre, et dont la valeur est approximativement  $\frac{1}{100}$ , en désignant ainsi le rapport  $\nu = \frac{i'}{i}$  des déviations du galvanomètre shunté et seul, sous l'action du même courant extérieur.

Soient

$g$  la résistance du galvanomètre;

$s$  la résistance du shunt;

$\rho$  la résistance du galvanomètre muni du shunt.

On a

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{g} + \frac{1}{s} = \frac{1}{g} \left( 1 + \frac{g}{s} \right) = \frac{1}{g} \left( 1 + \frac{i - i'}{i'} \right) = \frac{1}{g} \times \frac{i}{i'} = \frac{1}{\nu \times g},$$

en supposant, toutefois, que l'intensité extérieure du courant n'a pas été modifiée d'une façon appréciable par l'introduction du shunt dans le circuit, condition qu'il est toujours possible de réaliser par l'emploi d'une résistance additionnelle considérable sur le trajet du courant.

On tire de là

$$\rho = \nu \cdot g.$$

On peut donc déterminer la résistance  $\rho$  en fonction de  $g$  par deux mesures d'intensités relatives. Mais il est clair que cette détermination, faite directement avec le shunt au  $\frac{1}{100}$ , serait peu exacte : on a donc pris un shunt intermédiaire dont la valeur servira de terme de comparaison pour le galvanomètre et le shunt au  $\frac{1}{100}$ .

1° Shunt auxiliaire. Résistance additionnelle : 9800 $\Omega$ .

Déviations (doubles).

Galvanomètre seul.....	399,40	
» shunté.....	45,05	$\nu_1 = 0,1127$

2° Shunt au  $\frac{1}{100}$  par rapport au précédent. Résistance additionnelle : 4800 $\omega$ .

Déviations (doubles).		
Shunt auxiliaire.....	399,05	$v_2 = 0,09748$
» au $\frac{1}{100}$ .....	38,90	

Par suite, la valeur  $v$  du shunt au  $\frac{1}{100}$  est

$$v = v_1 \times v_2 = 0,01098,$$

et enfin, la résistance  $\rho$  du galvanomètre muni de ce shunt est

$$\rho = 0,01098g.$$

La résistance  $g$  du galvanomètre, qu'il est d'ailleurs inutile de connaître, est d'environ 7 $\omega$ .

La résistance  $d$  du fil AB a été déterminée d'une façon analogue en le mettant en dérivation sur le galvanomètre comparativement avec le shunt précédent. Soient  $I$  l'intensité du courant extérieur,  $i_1, i_2$  les intensités dans le galvanomètre muni successivement du shunt au  $\frac{1}{100}$  et du fil AB; on a

$$\begin{aligned} i_1 g &= (I - i_1) s, \\ i_2 g &= (I - i_2) d; \end{aligned}$$

on en déduit

$$\begin{aligned} \frac{i_2}{i_1} &= \frac{\frac{g}{s} + 1}{\frac{g}{d} + 1} = \frac{1}{v \left( \frac{g}{d} + 1 \right)} = v', \\ d &= \frac{v v' g}{1 - v v'}; \end{aligned}$$

on a trouvé précédemment

$$v = 0,01098g.$$

Quant à  $v'$ , l'expérience le détermine de la même manière :

Résistance additionnelle : 1000 $\omega$ .

Déviations (doubles).		
Shunt au $\frac{1}{100}$ .....	180	$v' = 0,13277$
Fil AB.....	23,9	

Il en résulte pour la résistance du fil AB

$$d = 0,001459g.$$

Enfin, les fils de communication AM + NB ont été soudés sur le fil AB exactement aux points A et B où se faisaient les prises dans l'expérience précédente. On obtenait ainsi un seul conducteur MABN avec lequel on pouvait faire dérivation sur le galvanomètre. On trouve ainsi

Résistance additionnelle :  $9800\omega$ .

Déviations (doubles).

Galvanomètre seul.....	397,2	$v'' = 0,1161$
» shunté.....	46,1	

La résistance totale est

$$f + d = \frac{v''}{1 - v''} g = 0,1313 g,$$

d'où

$$f = (0,1313 - 0,001459)g = 0,12984 g.$$

Il est inutile d'ajouter que les nombres donnés pour les déviations sont les moyennes d'au moins quatre expériences, toujours concordantes. Avec les données précédentes, on peut exprimer en ampères l'intensité du courant dans la lampe en fonction de la déviation N du galvanomètre. La formule qui donne cette intensité est la suivante :

$$I = 0,00010465 \frac{\rho + f + d}{d} N = 0^{\text{amp}}, 0102 N.$$

En résumé, l'énergie dépensée dans la lampe en une seconde aura pour expression :

1° Avec l'électromètre capillaire,

$$e \times (D + \varepsilon) \times 0,0102 N \times 10 \text{ mégergs},$$

D étant le nombre de daniells mis en opposition et  $\varepsilon$  la force électromotrice additionnelle, positive ou négative, qui ramènerait le ménisque au fil;

2° Avec l'électromètre Thomson,

$$\frac{e}{0,00935} (\sqrt{\sin \delta_0} - \sqrt{\sin \delta}) 0,0102 N \times 10 \text{ mégergs}.$$

Le daniell employé dans ces mesures était ainsi constitué :

Sulfate de cuivre saturé à 15°,  
Sulfate de zinc à 30 pour 100;  
Cuivre;  
Zinc amalgamé.

On a pris pour valeur de sa force électromotrice 1<sup>volt</sup>, 12 et, pour s'assurer de l'exactitude de ce nombre, aussi bien que de celle de la graduation du galvanomètre en unités absolues, opération toujours fort délicate, on a profité de l'installation du calorimètre de M. Berthelot, à propos de la vérification de la loi de Joule, pour comparer l'énergie dépensée dans la lampe et mesurée avec les données précédentes à la quantité de chaleur fournie directement par cette lampe au calorimètre qui la contenait.

Le Tableau suivant reproduit une expérience faite avec de l'eau distillée qu'on avait laissée le moins possible au contact des vases de verre et qui était suffisamment isolante pour ne permettre aucune trace d'électrolyse entre les fils de la lampe :

19 Janvier 1884.

	Temps.	Température du calorimètre.	Galvanomètre.	Électromètre capillaire (D = 3, ε < 0).
	10. 36. 0 <sup>s</sup>	11. 62		
Départ...	40	11. 62 } correction : 0	228, 5	0
	45	94	137, 0	28, 4 <sup>mm</sup>
	50	12. 28	136, 3	29, 6
Arrêt....	53. 10	53	136, 0	30, 0
	55	54 } correction : 0	227, 1	0
	57	54	»	»
	11. 0	54	»	»

Poids en eau du calorimètre..... 604<sup>gr</sup>, 388.

On déduit de cette expérience les résultats suivants :

Durée du passage.....	79 <sup>s</sup>
Élévation de température.....	0°, 92
Déviatiion moyenne du galvanomètre.....	91, 4
Différence de potentiel aux bornes.....	(3 - 0, 225) × 1, 12

Adoptant pour équivalent mécanique de la chaleur le nombre 428 et rapportant les résultats à ce qu'ils seraient pour 10<sup>m</sup> de passage, on obtient

Énergie dépensée (exprimée en calories).....	$\frac{600}{42} \times 2, 775 \times 1, 12 \times 0, 0102 \times 91, 4 = 414^{\text{cal}}$
Quantité de chaleur dégagée dans le calorimètre..	$\frac{600}{79} \times 0, 92 \times 604, 388 = 417$

La concordance de ces nombres est absolument satisfaisante si l'on remarque que la lecture du thermomètre n'a été faite qu'à  $\frac{1}{100}$  de degré près et qu'une erreur de cet ordre entraînerait une variation de plus de 4 unités

dans le nombre qui exprime la quantité de chaleur dégagée au sein du calorimètre.

Donc, en désignant par  $d$  la différence de potentiel en daniells et par  $N$  la lecture au galvanomètre, l'énergie dépensée dans la lampe sera donnée, en unités volt-ampère, par l'expression

$$1,12 \times 0,0102 \times N \times d = 0,011424 \times N \times d;$$

il suffit de multiplier ce nombre par  $10^7$  pour passer ainsi aux unités absolues.

### III. — DÉTERMINATIONS PHOTOMÉTRIQUES.

#### *Source de comparaison.*

La méthode photométrique employée dans ces recherches consistait dans la comparaison des intensités d'une même radiation prise dans le spectre de la lampe à incandescence et dans le spectre d'une source auxiliaire. Le choix de cette dernière est presque indifférent lorsqu'il ne s'agit que de déterminer la relation qui lie l'intensité d'un rayonnement simple à l'énergie électrique dépensée dans la lampe : il est clair, en effet, qu'il suffit que la source considérée contienne cette radiation avec une intensité qui permette la comparaison dans l'appareil de mesure employé. Néanmoins, on conçoit que cette source auxiliaire devra satisfaire à une condition essentielle : c'est d'être constante pendant toute la série des mesures, ou, si cette constance est légèrement altérée au cours d'une détermination, de permettre d'effectuer les corrections au moyen desquelles on se trouvera affranchi des variations précédentes d'intensité.

On peut admettre qu'une lampe à incandescence à filament de charbon, comme celle de M. Abney, ou à lame de platine, comme l'étalon proposé par M. Schwendler (<sup>1</sup>), lorsqu'elle est traversée par un courant d'intensité constante, sera capable de constituer une source de comparaison absolument fixe, du moins pendant la durée d'une expérience ; mais, quel que soit le générateur d'électricité employé, même avec des accumulateurs saturés, la fixité d'un courant est presque impossible à obtenir en toute rigueur pendant plusieurs heures, et l'on verra plus tard que, dans ces lampes fonction-

(<sup>1</sup>) SCHWENDLER, *On a new standard of light* (*Philos. Magaz.*, t. VIII, p. 392).

nant en régime normal, la moindre variation d'intensité du courant entraîne une variation considérable dans l'intensité du rayonnement lumineux. De plus, les corrections qu'il conviendrait d'apporter aux résultats par le fait de ces variations nous sont inconnues, puisque nous ignorons, jusqu'à présent, la relation qui existe, pour une lampe donnée, entre l'intensité d'une radiation et l'intensité du courant.

Enfin, et c'est là un inconvénient très grave lorsqu'il s'agit de déterminer la *nature* de la source à étudier par rapport à celle de la source auxiliaire, l'intensité lumineuse totale de cette dernière n'est, dans aucun de ses états, proportionnelle à l'intensité particulière à chaque radiation, c'est-à-dire que les variations d'énergie dépensée dans la lampe entraînent, en même temps qu'une variation inconnue dans chaque rayonnement simple, une modification également inconnue dans la nature du rayonnement total. L'étalon de lumière présenté par M. Violle au Congrès des électriciens et adopté par la Conférence internationale des unités électriques réalise absolument les conditions théoriques d'une source type, en ce sens que, étant déterminé par une surface incandescente dont la température est nettement définie par un phénomène physique intimement lié à cette température, la nature de ce rayonnement ainsi que sa valeur intrinsèque sont absolument définies. Néanmoins on doit reconnaître que, pour les mesures courantes, cet étalon n'a pas encore été réalisé dans une forme qui permette de l'employer sans difficulté.

En dehors de la lampe à gaz de M. Wernon-Harcourt dont l'usage ne s'est pas encore assez répandu pour qu'il soit possible de l'apprécier, le type le plus commun est la bougie. Cette source donne une lumière de composition presque identique ; mais son intensité varie considérablement avec le pays de production et, qui plus est, avec les différents produits d'une même fabrication. C'est ainsi que, suivant M. F. Le Blanc, et d'après les expériences d'une commission anglaise dont faisait partie M. Williamson, des *candles* de blanc de baleine, provenant d'une même fabrique anglaise, présentaient entre elles des écarts de 14 à 15 pour 100. Les bougies françaises sont sujettes à des variations analogues. Enfin la bougie, quelles que soient sa composition et son origine, est sujette à modifier sa combustion sous l'action des causes les plus légères en apparence, tirage, courant d'air, etc., et, par suite, l'intensité de sa lumière peut varier de quantités notables dans un temps très court. C'est ainsi que M. Schwendler, dans ses mesures photométriques relatives à l'étalon (P.L.S), a constaté des variations du simple au double

dans l'intensité lumineuse d'une même bougie, selon que l'air arrive plus ou moins librement sur la flamme.

En France, l'usage de la lampe Carcel, comme type de source lumineuse, a prévalu jusqu'à présent et il faut reconnaître que si, au point de vue d'une définition théorique rigoureuse, elle est inférieure au type de M. Violle, elle offre, pour les déterminations courantes, des avantages auxquels on serait loin de s'attendre tout d'abord et qu'une pratique de quelque temps met pleinement en évidence. D'ailleurs, des expériences comparatives de M. Violle (1) ont justifié cette préférence en montrant que la valeur lumineuse de la lampe Carcel, rapportée à l'étalon absolu, est parfaitement définie par les conditions indiquées pour son fonctionnement. C'est ainsi que sept séries de mesures effectuées avec une première lampe Carcel ont donné, comme moyenne de nombres très concordants, pour valeur de cette source par rapport à l'étalon de platine, le nombre  $\frac{1}{2,08}$ , et qu'une autre lampe Carcel a donné, par dix-huit déterminations également concordantes, quoique effectuées par l'intermédiaire d'une source auxiliaire, le nombre, très voisin du précédent,  $\frac{1}{2,07}$ . Donc, au point de vue de l'intensité absolue de la source lumineuse, on peut, en toute sécurité, s'adresser à la lampe Carcel fonctionnant avec les précautions prescrites. Il suffira ensuite de multiplier les intensités obtenues par le facteur  $\frac{1}{2,08}$  pour passer ainsi et sans difficulté aux unités adoptées. Ces conditions, qu'il est bon de rappeler ici, parce qu'il importe de ne pas s'en écarter, sont résumées dans la description suivante du carcel donnée par MM. Dumas et Regnault (2) :

Diamètre extérieur du bec.....	<sup>mm</sup> 23,5
» intérieur (courant d'air).....	17,0
» du courant d'air extérieur.....	45,5
Hauteur totale du verre.....	290,0
Distance du coude à la base du verre.....	61,0
Diamètre extérieur au niveau du coude.....	47,0
» au haut de la cheminée.....	34,0
Épaisseur moyenne du verre.....	2,0

La mèche doit être du type de la mèche moyenne, dite des *phares*. Elle doit être formée d'une tresse de soixante-quinze brins et peser 3<sup>gr</sup>,06 par décimètre. Ces mèches doivent être conservées avec soin à l'abri de l'humidité ; il suffit pour cela de les placer dans un vase de verre à double fond,

(1) VIOLLE, *Séances de la Société de Physique*, année 1884, p. 141.

(2) DUMAS et REGNAULT, *Annales de Chimie et de Physique*, 3<sup>e</sup> série, t. LXV, p. 489.



à la partie inférieure duquel on a disposé des fragments de chaux vive, tandis que le fond supérieur, percé de trous, supporte les mèches soigneusement enveloppées. Enfin le couvercle, rodé à l'émeri, est appliqué au moyen d'un peu de graisse qui s'oppose à toute introduction d'humidité extérieure. L'huile employée doit être de l'huile de colza épurée.

Dans les recherches qui vont suivre, on s'est conformé scrupuleusement à ces instructions : les mèches et l'huile employées étaient fournies directement par M. Deleuil et mises à l'abri de toute cause d'altération.

A ces conditions d'établissement de la lampe viennent s'ajouter les conditions de régime, qui sont de beaucoup les plus importantes. S'il est vrai, en effet, que, avec un combustible bien défini comme celui que nous employons, la quantité de charbon mise en liberté dans la flamme et rendue incandescente est proportionnelle à la dépense, il faut reconnaître cependant que cette quantité de charbon et, par suite, l'intensité de la flamme, sont variables avec la hauteur de la mèche, la position du verre par rapport à celle-ci, en un mot avec la manière dont la combustion se produit.

C'est pour définir ces conditions de dépense et de combustion que Dumas et Regnault recommandent d'élever la mèche à une hauteur de 10<sup>mm</sup> et le verre de telle sorte que le coude soit à 7<sup>mm</sup> au-dessus du niveau de la mèche. Dans cet état, et lorsqu'elle a pris son allure régulière, la lampe doit brûler environ 42<sup>gr</sup> d'huile à l'heure avec une flamme de 35<sup>mm</sup> de hauteur. En réalité, ce régime régulier n'est atteint que plus d'une demi-heure après l'allumage et lorsque les différentes parties qui entourent la mèche ont pris leur température stationnaire ; mais alors il se conserve pendant près de deux heures presque sans variations et, en tous cas, sans ces variations brusques des autres sources usuelles, qui sont si préjudiciables aux expériences.

On aura l'occasion de s'assurer de cette constance de la lampe Carcel en régime normal par les Tableaux qui suivront ; mais il importe, dès à présent, de faire une remarque à ce sujet. Dans toute expérience de photométrie, on s'efforce, et c'est là en effet un point essentiel, de se placer dans les conditions les plus complètes d'obscurité : l'œil, dans ces circonstances, prend, à n'en pas douter, une acuité que le moindre filet de lumière lui enlève en grande partie. Pour cela, on dissimule le plus possible les sources de lumière employées dans les déterminations et l'on est tenté de les entourer d'écrans qui ne laissent d'ouverture libre que pour les produits de la combustion. Ces dispositions peuvent avoir la plus fâcheuse influence sur le régime de ces sources et en particulier de la lampe Carcel. C'est ainsi qu'au

cours des expériences actuelles on avait entouré cette lampe d'un globe métallique en laiton noirci qui s'appuyait sur le rebord de la galerie et présentait deux ouvertures, l'une libre, pour l'observation, l'autre se prolongeant par une cheminée également métallique qui emprisonnait le verre jusqu'à son extrémité.

On avait ainsi isolé la source; mais il ne fut pas difficile de constater que, par suite de l'échauffement énorme qui résultait, pour la mèche, de cet emprisonnement de la flamme, la dépense s'accélérait dans une proportion considérable et que, de plus, la combustion se modifiait de telle sorte que la mèche ne tardait pas à se carboniser sur toute sa longueur. C'est ce qui résulte de l'expérience suivante, faite environ deux heures après l'allumage :

Marche de la lampe			
avec globe.		sans globe.	
Temps.	Différence.	Temps.	Différence.
h m s 12.41.25	m s 6.37		
47.58			
»	6.42	h m s 12.57.11	m s 7.0
»		1. 4.11	
1. 7.54	6.47	»	7.4
14.41		»	
»		22.14	7.8
»		29.22	

Il faut donc, pour se préserver de la lumière inutile de la source, ou bien élargir le cadre des écrans protecteurs, ou bien, si cela est possible, disposer la lampe dans une chambre contiguë à la salle d'expériences et dont le mur de séparation sera percé d'une ouverture pour l'observation, et l'y laisser brûler en liberté.

La lampe Carcel normale est définie par une dépense de 42<sup>gr</sup> d'huile à l'heure : c'est dans ce régime qu'elle vaut  $\frac{1}{2,08}$  de l'étalon absolu. Or on conçoit que, quelque soin que l'on mette à repérer exactement le verre sur la monture et la mèche sur le verre, au moyen de traits gravés sur ce dernier, il sera impossible de régler exactement la dépense à ce point. Mais les expériences d'Audouin et Bérard ont montré que l'intensité lumineuse de la flamme était, de part et d'autre de ce régime normal, proportionnelle au poids du combustible brûlé dans l'unité de temps, pourvu toutefois que la dépense ne soit pas inférieure à 38<sup>gr</sup> ni supérieure à 46<sup>gr</sup>. C'est là un avantage considérable de cette source que, même dans ses variations, elle restera

comparable à elle-même et pourra toujours être exprimée en fonction de sa valeur normale, puisqu'il suffira de déterminer, à chaque instant, sa dépense, pour connaître son intensité. Cette estimation de la dépense se fait au moyen de la balance photométrique de M. Deleuil, dont l'un des plateaux est disposé pour recevoir la lampe, tandis que l'autre contient une tare. Lorsque, par le fait de la dépense, la lampe se soulève, le fléau, en s'inclinant, fait basculer un petit marteau qui vient frapper sur un timbre. On note l'heure sur un chronomètre à secondes et l'on place un poids déterminé (5<sup>gr</sup> ou 10<sup>gr</sup>) du côté de la lampe. Le fléau revient s'appuyer sur ses arrêts, on relève le marteau et lorsqu'au bout de quelque temps un poids d'huile égal au poids ajouté a été brûlé, le fléau s'incline de nouveau; le marteau frappe et l'observateur, prévenu du reste de l'époque des déclenchements successifs par la régularité même avec laquelle ils se succèdent, note l'heure de nouveau. Le Tableau suivant, emprunté à une expérience photométrique, donne une idée de la marche de la lampe :

8 Avril 1884.

Lampe allumée à 5<sup>h</sup> 35<sup>m</sup>. — Poids de 5<sup>gr</sup>.

Heure.	Différence en secondes.	Heure.	Différence en secondes.
5. 56. 58 <sup>m s</sup>		7. 0. 12 <sup>h m s</sup>	416
6. 4. 15	437	7. 7. 6	414
11. 27	432	14. 1	415
18. 31	424	20. 57	416
25. 33	422	27. 53	416
32. 32	419	34. 51	418
39. 30	418	41. 51	420
46. 22 (?)	412	48. 49	418
53. 16	414	55. 47	418
	416	8. 3. 45	418

On voit que, dans cette expérience, qui a été prise au hasard et ne peut compter parmi les plus régulières, la dépense n'a commencé à devenir constante qu'environ une heure après l'allumage, mais elle est restée alors sensiblement constante pendant une heure et demie, et probablement elle se serait maintenue plus longtemps si l'on n'avait pas mis fin à l'expérience. Quoiqu'il en soit, et même pour les variations continues subies par la lampe dans la première heure, on serait encore en droit d'appliquer la loi de proportionnalité de l'intensité lumineuse à la dépense, puisque tous ces nombres se

trouvent compris entre les nombres extrêmes 390<sup>s</sup> et 473<sup>s</sup>, en dehors desquels l'application de cette loi n'est plus permise. Mais dans bien des cas la marche est plus régulière et le Tableau suivant en fournit un exemple :

3 Avril 1885.

Lampe allumée à 12<sup>h</sup> 35<sup>m</sup>.

Heure.	Différence en secondes.	Heure.	Différence en secondes.
<sup>h</sup> <sup>m</sup> <sup>s</sup> 12.57. 9	428	<sup>h</sup> <sup>m</sup> <sup>s</sup> 2. 0.54	424
1. 4.17	426	7.58	424
11.23	426	15. 2	425
18.29	426	22. 7	424
25.35	423	29.11	424
32.38	424	36.15	424
"	424		
"	424		
53.50	424		
	424		

} moy.

Ici encore on voit que ce n'est guère que trois quarts d'heure après l'allumage que la lampe prend son véritable régime normal; mais alors elle marche avec une régularité parfaite pendant plus d'une heure qu'a duré l'expérience, et les nombres qui précèdent sont une garantie à la fois de l'excellence de la source lumineuse et de la fidélité des déclenchements de la balance, même sous une charge aussi considérable que celle de la lampe et des poids qui lui font équilibre : il est donc légitime d'appliquer, dans ces conditions, la loi de proportionnalité indiquée précédemment.

Enfin, en nous plaçant à un point de vue différent, la lampe Carcel présente ce nouvel avantage que, même dans ses variations, elle reste comparable à elle-même sous le rapport de la composition de sa lumière, et nous aurons plus tard à invoquer cette propriété lorsqu'il s'agira de fixer la composition spectrale de la lumière émise par nos lampes à incandescence.

Voici par quelles considérations M. Crova rend compte de cette fixité dans la composition de la lumière Carcel et, en général, des sources à charbon incandescent au sein d'une flamme (1) : « Un combustible défini, tel que l'huile de colza, développe une quantité de chaleur proportionnelle au poids de combustible brûlé et, comme cette chaleur est employée à élever la

(1) CROVA, *Étude des radiations* (*Ann. de Chimie et de Phys.*, 3<sup>e</sup> série, t. XIX, p. 167).

température du carbone qui se sépare à l'état solide au sein de la flamme et celle des produits de la combustion, la température du carbone ainsi isolé sera constante, quelle que soit la masse de la flamme, lorsque cette masse variera entre des limites assez étendues. La composition de la lumière émise sera donc constante, quoique son intensité puisse varier beaucoup. Ce que nous venons de dire suppose que la combustion est complète et qu'elle se fait toujours dans les mêmes conditions, c'est-à-dire avec dépôt de carbone solide au sein d'une masse gazeuse incandescente, de composition constante. Il faudra donc éliminer les cas où la flamme serait assez petite pour commencer à brûler bleu, et assez grande pour que la combustion soit incomplète et qu'il y ait dépôt de carbone non brûlé. Dans ce dernier cas, la flamme devient fumeuse et sa couleur rougeâtre accuse un abaissement de température. » M. Crova a, d'ailleurs, vérifié directement le fait précédent, soit avec deux lampes de même grosseur et donnant des lumières d'intensités très différentes, soit avec des lampes de dimensions différentes et donnant des flammes de hauteur très variable. Ainsi donc, on arrive à cette conclusion que « la composition de la lumière donnée par la lampe Carcel est, en général, indépendante de son intensité et ne peut être altérée que dans deux cas extrêmes dont il est toujours facile de s'éloigner, celui où elle tend à brûler bleu et celui où elle devient fumeuse ».

*Méthodes photométriques.* — Nous prendrons donc, comme source auxiliaire, la lampe Carcel ainsi définie avec ses conditions de constance et de comparabilité, et nous déterminerons, pour chaque état de la lampe à incandescence, l'intensité lumineuse de ses radiations par rapport à celles de la lampe Carcel.

Les méthodes photométriques susceptibles d'être employées à cette détermination se rattachent presque exclusivement à trois catégories :

1° Dans la première, on compare les éclaircissements produits par les deux sources sur deux surfaces voisines et l'on atténue l'un de ces éclaircissements de façon à le rendre, autant que possible, égal à l'autre. Des conditions mêmes de l'expérience on déduit le pouvoir éclairant total de l'une des sources par rapport à l'autre : c'est le principe des photomètres de Bouguer, Rumford, Foucault, etc. Si les deux sources ont un éclat trop fort et capable de fatiguer l'œil, on les atténue dans des proportions connues; mais alors la méthode suppose que les lumières sont de même teinte, car on sait que la notion de teinte qui disparaît à mesure que l'éclat augmente se manifeste, au contraire, lorsqu'on atténue suffisamment l'éclaircissement produit

par les sources sur deux plages voisines (1). Il est à remarquer, cependant, avec Aubert (2), que cette notion de couleur qui s'accroît à mesure que l'intensité diminue tend, par contre, à s'effacer lorsque la grandeur des plages, sur lesquelles l'œil effectue la comparaison, diminue de plus en plus. Ce fait intéressant a donné naissance aux expériences de Helmholtz, Macé de Lépinay et Nicati sur la détermination de l'intensité relative des rayons diversement colorés.

Comme se rattachant encore à cette catégorie, on peut citer l'appareil très élégant décrit par M. Cornu (3) sous le nom de *microphotomètre*, et qui permet en effet de prendre dans les deux sources deux régions très petites que l'on amène à se juxtaposer devant l'œil et dont on peut ainsi déterminer les éclats intrinsèques relatifs.

Dans les méthodes que nous venons de rappeler, on modifie l'éclairement produit par les sources soit en les éloignant plus ou moins de l'écran, et calculant cet éclairement par la loi, qui paraît absolument rigoureuse, du carré des distances, soit en obturant, dans des proportions connues, les faisceaux qu'elles envoient sur les plages à comparer.

Arago, le premier, après avoir vérifié la loi de Malus, en fit usage, dans les déterminations photométriques, pour éteindre, dans un rapport donné, l'éclat des sources à étudier. Parmi toutes les dispositions, d'ailleurs nombreuses, qui ont été mises en œuvre depuis Arago, il suffira de rappeler celle que M. Becquerel a adoptée dans des recherches analogues à celles-ci, et dont il a été déjà question. Imaginons une lunette ordinaire, formée d'un objectif A et d'un oculaire O ; sur le milieu de la longueur vient s'adapter un second tube, perpendiculaire au premier et muni également d'un objectif B. Les deux sources à comparer sont placées respectivement devant les objectifs A et B et, au moyen d'un prisme à réflexion totale placé à la rencontre des axes optiques, on peut juxtaposer dans le plan focal de l'oculaire les images réelles de ces deux sources. Chaque tube porte deux nicols dont l'un est mobile. Du côté de B, où se trouve la source auxiliaire (lampe Carcel), ce nicol n'est pas repéré ; il ne sert qu'à atténuer, dans un rapport d'ailleurs quelconque, l'éclat de cette source de comparaison. Du côté de A où l'on place la source à étudier, le nicol mobile entraîne une alidade mo-

---

(1) GROVA, *Étude des radiations* (*Annales de Chimie*, 5<sup>e</sup> série, t. XIX); — CORNU, *Études photométriques* (*Journal de Physique*, 1<sup>re</sup> série, t. X, p. 195).

(2) AUBERT, *Optique physiologique*, p. 232.

(3) CORNU, *Études photométriques* (*loc. cit.*, p. 194).

bile sur un cercle divisé. Soit  $\alpha$  la rotation de ce nicol à partir de l'extinction, la fraction de lumière qui traverse le tube A est  $\sin^2 \alpha$ . C'est, par exemple, la proportion dans laquelle il faut réduire l'éclat intrinsèque  $I_r$  de la source inconnue pour l'amener à la même valeur que l'éclat  $L_r$  de la source auxiliaire. Ce qui précède suppose nulles les absorptions subies par les rayons lumineux dans leur trajet; mais, si  $a$  et  $b$  sont les proportions transmises de chaque faisceau, on aura

$$aI_r \sin^2 \alpha = bL_r.$$

Une permutation des deux sources donnera

$$aL_r \sin^2 \beta = bI_r,$$

d'où l'on déduit

$$\frac{I_r}{L_r} = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}.$$

Quel que soit, du reste, dans cette première catégorie d'appareils, le moyen employé pour amener à l'égalité l'éclairement des deux plages voisines, il est clair que nous n'obtiendrons ainsi que le rapport des intensités *totales* des deux sources considérées. Si nous voulons les analyser d'une façon plus intime, il faudra isoler, dans les faisceaux qu'elles envoient, les radiations sur lesquelles doit porter la comparaison. On pourra arriver à ce résultat, d'une manière imparfaite, il est vrai, au moyen de verres colorés. C'est le mode de séparation qui a été employé par M. E. Becquerel.

Nous devons remarquer, enfin, à propos de cette comparaison de deux plages contiguës, que l'œil n'est pas capable de l'effectuer d'une façon absolument rigoureuse.

Bouguer a reconnu que cet organe devient insensible à leur différence lorsqu'elle n'est plus que la  $\frac{1}{64}$  partie de l'éclat commun des deux sources, quel que soit, d'ailleurs, ce dernier. Désignons par  $\frac{1}{n}$  cette fraction, par  $i$  et  $i'$  les valeurs intrinsèques des deux sources, par  $a$  et  $a'$  les proportions dans lesquelles elles sont amenées à l'éclairement des plages; on aura, lorsque l'égalité paraîtra établie,

$$a'i' = ai \pm \frac{1}{n} \frac{ai + a'i'}{2},$$

ou sensiblement

$$ai = a'i' \left( 1 \pm \frac{1}{n} \right),$$

$$\frac{i}{i'} = \frac{a'}{a} \left( 1 \pm \frac{1}{n} \right).$$

c'est-à-dire que le rapport des intensités sera connu par le rapport expérimental  $\frac{a'}{a}$  avec une approximation de  $\frac{1}{n}$  de sa valeur.

2° Cette imperfection inévitable de l'œil et, en même temps, cette propriété énoncée par Bouguer de la constance de  $n$  ont servi de point de départ à une seconde catégorie de méthodes qui consistent, non plus à juxtaposer, mais à superposer, du moins en partie, les plages correspondant aux deux sources, et à affaiblir l'éclairement de l'une d'elles jusqu'à ce qu'elle semble s'effacer et disparaître dans l'éclairement de l'autre. Si la loi de Bouguer est exacte, il est clair qu'à ce moment on a

$$a' i' = \frac{a i}{n}, \quad \frac{i}{i'} = n \frac{a'}{a}.$$

Donc le coefficient  $n$ , qui, dans la méthode précédente, constituait, par son inverse, le terme de correction, constitue ici le coefficient de relation et, par conséquent, il a acquis une importance considérable. Aussi Masson (1), qui a employé cette méthode dans ses recherches de photométrie électrique, s'est-il efforcé, d'abord, d'établir la constance de ce coefficient. Il a trouvé, en effet, que ce nombre  $n$  était indépendant de l'éclat moyen et de la couleur des plages et qu'il variait, ainsi que l'on doit s'y attendre, avec l'observateur. En réalité, ce nombre  $n$ , qui a servi à définir ce que l'on appelle la *sensibilité pour les différences*, n'est absolument constant dans aucun cas. M. Helmholtz a fait remarquer qu'il ne pouvait être indépendant de l'éclat, lorsqu'il s'agit de faibles intensités; d'un autre côté, la sensibilité pour les différences n'est pas indépendante de la couleur; elle paraît, au contraire, liée au phénomène de Purkinje par la relation (2)

$$n' = nA,$$

A étant le coefficient qui caractérise ce phénomène pour les radiations correspondant aux sensibilités  $n$  et  $n'$ . Il en résulte que la constance de  $n$  est liée à la constance de A; or, si A est constant pour toutes les radiations moins réfrangibles que le vert moyen, sa valeur et, par suite, celle de  $n$  vont en diminuant à mesure que l'on choisit, pour la comparer à l'une des radiations rouge-vert, des radiations de plus en plus réfrangibles. Par exemple, si

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 3<sup>e</sup> série, t. XIV.

(2) MACÉ DE LÉPINAY et NICATI, *Photométrie hétérochrome* (*Annales de Chimie et de Physique*, 5<sup>e</sup> série, t. XXX, p. 165).



l'on admet pour la région rouge-vert le nombre  $n = 64$ , donné par Bouguer pour la lumière blanche, on déduira, des valeurs connues de A, et dans le cas le plus favorable d'une image rétinienne de faible étendue,

$\lambda$ .	$n$ .
0 <sup>m</sup> ,430,	54,4.

On voit, par ces nombres, que la méthode actuelle ne paraît pas devoir se prêter à des déterminations précises, du moins dans les cas où l'intensité et la couleur sont susceptibles de varier dans des proportions considérables.

3° Enfin une troisième catégorie de photomètres comprend les appareils où l'on superpose, non plus partiellement, mais d'une façon complète, les deux faisceaux lumineux émanés des sources. On produit alors dans ce champ commun un phénomène qui disparaîtra lorsque l'égalité d'éclat sera obtenue. C'est le principe du photomètre proposé par Arago, jamais employé du reste, et qui repose sur ce fait que les anneaux des lames minces, réfléchis et transmis, produits par une même source, sont complémentaires en intensité et en coloration. C'est aussi le principe du photomètre attribué à Babinet et dans lequel on s'appuie sur le fait d'égalité des quantités de lumière polarisée qui se trouvent dans un faisceau réfléchi ou réfracté. C'est, enfin, le principe des appareils à franges complémentaires et, en particulier, du photomètre de M. H. Wild (1).

### *Spectrophotomètres.*

Nous avons vu que ces différents photomètres peuvent être appliqués à l'étude de radiations isolées, à condition de munir l'œil de systèmes transparents colorés qui ne laissent passer que certains groupes de radiations à peu près déterminés ; mais il est clair que la comparaison ne sera exacte et même possible dans toute la série des couleurs que si les deux lumières sont réduites en spectres sur lesquels s'effectuera la mesure. Cette application du spectroscope aux observations photométriques a été faite pour la première fois par M. Govi (2), en 1860, et les appareils fondés sur ce principe ont pris le nom de *spectrophotomètres*. D'après ce qui a été dit précédemment, on ne s'étonnera pas de voir la première et la troisième méthode photométrique adaptées exclusivement à ces appareils.

(1) *Poggendorff's Annalen*, Bd. XLIX, p. 235; 1856.

(2) *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. L, p. 156.

A la première se rattache d'abord l'appareil de M. Govi dans lequel les deux faisceaux lumineux étaient reçus sur les deux moitiés de la fente du spectroscopé : on obtenait ainsi, sur un écran de Foucault, deux spectres juxtaposés dans lesquels un diaphragme permettait d'isoler deux plages correspondantes. Pour les amener à l'égalité, on déplaçait l'une des sources. M. Vierordt (<sup>1</sup>), dans ses études sur l'absorption de la lumière par les milieux transparents, décrivit un appareil analogue au précédent, mais dans lequel l'égalité des plages de même réfrangibilité était obtenue par l'obturation plus ou moins complète de l'un des faisceaux sur la fente du spectroscopé. Pour cela, la fente était formée, d'un côté, par une lame fixe, de l'autre, par une double lame dont les moitiés, munies de vis micrométriques; permettaient de donner à chaque partie de la fente une largeur connue. L'éclat de chaque spectre était proportionnel à la largeur de la fente correspondante, du moins tant que cette largeur ne s'exagère pas au point de rendre impur le spectre qu'elle détermine; auquel cas, les plages cessent absolument d'être comparables. C'est là un défaut très grave de cet appareil lorsqu'il est appelé à déterminer des rapports un peu grands d'intensité. Enfin le troisième mode de réduction, basé sur la loi de Malus, a été appliqué à cette même méthode par M. Glan (<sup>2</sup>); la fente du spectroscopé est partagée en deux moitiés par une lame transversale de laiton et les deux spectres, non juxtaposés, que donnerait l'appareil, sont transmis à travers un prisme de Wollaston qui donne de chacun d'eux deux images polarisées à angle droit. Pour une largeur convenable de la lame de laiton, deux de ces spectres, appartenant chacun à l'une des moitiés de la fente et polarisés à angle droit, peuvent être amenés au contact, et l'égalité des plages ainsi juxtaposées s'obtient au moyen d'un nicol placé entre le prisme de Wollaston et le système dispersif. Cet appareil est sujet à quelques critiques, bien qu'il repose sur le principe fort juste, dû à Foucault, de la comparaison de deux plages de teinte uniforme, rigoureusement juxtaposées et dont la ligne de démarcation doit disparaître au moment de l'égalité. C'est qu'en effet le dispositif de M. Glan ne permet pas de satisfaire à ces conditions essentielles. D'abord, les deux plages, formées de rayons émanés du prisme de Wollaston, les uns à l'état ordinaire, les autres à l'état extraordinaire, ne pourront être au point en même temps, et leur démarcation manquera de net-

---

(<sup>1</sup>) *Poggendorff's Annalen*, 5<sup>e</sup> série, Bd. XX, p. 172; 1870.

(<sup>2</sup>) *Wiedemann's Annalen*, Bd. I, p. 353; 1877.

teté. En outre, l'angle de duplication n'étant pas le même pour les rayons de toute réfrangibilité, le contact des spectres n'aura lieu rigoureusement qu'en un point. Nous verrons comment, dans le spectrophotomètre qui a servi aux recherches actuelles, M. Crova, en conservant le principe excellent de Foucault, a évité les inconvénients nombreux de l'appareil de M. Glan.

Enfin, M. Gouy (1) a donné la description d'un instrument spécialement affecté à l'étude des spectres discontinus et de très faible éclat.

Les spectrophotomètres à franges découlent tout naturellement des photomètres de ce genre dont nous avons parlé. C'est ainsi que M. Wild (2) a pu transformer son appareil en spectrophotomètre par la seule interposition d'un prisme d'Amici à arêtes horizontales entre le rhomboèdre de spath et le polariscope de Savart. Déjà M. Trannin (3) avait donné la description d'un appareil analogue au précédent et dans lequel on produit deux spectres cannelés de Fizeau et Foucault, que l'égalité d'intensité fait disparaître dans les diverses radiations. D'après M. Wild, la sensibilité de ce phénomène de disparition des franges est telle, qu'elle permet une approximation de  $\frac{1}{500}$  à  $\frac{1}{1000}$ . Il y a de sérieuses raisons de penser que cette limite de sensibilité est loin d'être atteinte, et d'ailleurs la construction fort compliquée de ces appareils rendrait cette sensibilité illusoire au point de vue de l'approximation des mesures. De plus, au point de vue pratique de la fatigue de l'œil, ce mode d'observation est défectueux ; la frange, en effet, disparaît à la fois, parce que son éclat se rapproche de celui des parties voisines et aussi parce qu'elle semble se rétrécir peu à peu à mesure qu'elle s'éclaire. De là, pour l'œil qui doit suivre ces variations de contour, une attention et par suite une fatigue fort préjudiciables aux observations. Aussi ne faut-il pas s'étonner si les polarimètres fondés sur ce principe ont été peu à peu abandonnés dans la pratique et remplacés par les polarimètres à pénombre, c'est-à-dire à plages juxtaposées.

*Appareil photométrique.* — Le spectrophotomètre de M. Crova employé dans ces recherches échappe à la plupart des reproches précédents. Il a été établi, par son auteur, après une étude complète des imperfections des appareils alors existants (4) et des conditions auxquelles doivent satisfaire les

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 5<sup>e</sup> série, t. XVIII, p. 16; 1879.

(2) *Wiedemann's Annalen*, t. XX, p. 452; 1883.

(3) *Mesures photométriques (Journal de Physique)*, 1<sup>re</sup> série, t. V, p. 297; 1876).

(4) *Sur les spectrophotomètres (Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences)*, t. XCII, p. 36).

différentes parties de l'instrument pour remédier, autant que possible, aux défauts inévitables des images spectrales <sup>(1)</sup>. La description complète en a été donnée par M. Crova <sup>(2)</sup>; nous ne reviendrons donc pas sur les détails de sa construction, nous bornant à en rappeler les dispositions les plus importantes. La fente collimatrice, parfaitement régulière dans toute sa longueur, reçoit, sur sa moitié inférieure, les rayons d'une première source placée dans la direction de l'axe du tube et, sur sa moitié supérieure, les rayons de la seconde source placée latéralement. La ligne de séparation des deux faisceaux, au moment où ils pénètrent ainsi dans l'appareil, est constituée par l'arête, perpendiculaire à la fente, d'un prisme à réflexion totale qui ramène, dans la direction de l'axe, les rayons émanés de la source latérale. Après avoir traversé le collimateur et le système des prismes, ces deux faisceaux viennent former, dans le plan focal de l'oculaire, les images spectrales des deux moitiés de la fente, superposées et se touchant sur toute leur longueur, si l'arête du prisme à réflexion totale est bien perpendiculaire à la fente.

On voit, à ce dernier point de vue, l'avantage de cette disposition sur celles où le prisme a ses arêtes parallèles à la fente et où, par conséquent, la délimitation des faisceaux se fait par le plan tout entier de la section droite. Seulement, dans ces conditions, la fente collimatrice devrait être horizontale, ainsi que les arêtes des prismes dispersifs, ce qui est un ennui pour l'observation des spectres. Un premier moyen d'obvier à cet inconvénient consisterait à laisser l'arête des derniers prismes verticale et à placer, entre la fente horizontale et l'objectif du collimateur, un prisme redresseur analogue à celui du spectroscopie à fente inclinée <sup>(3)</sup>: ce prisme, placé à 45° sur la direction de la fente, donnerait de celle-ci une image virtuelle verticale, c'est-à-dire parallèle aux arêtes des prismes. M. Crova a résolu la question d'une manière plus commode, en laissant la fente verticale et plaçant sur la face horizontale du premier prisme à réflexion totale la face correspondante d'un second prisme dont les arêtes, et par suite la face hypoténuse, sont parallèles à l'axe du collimateur. En réalité, ces deux

---

<sup>(1)</sup> *Étude des aberrations des prismes et de leur influence sur les observations spectroscopiques* (*Annales de Chimie et de Physique*, 5<sup>e</sup> série, t. XXII, p. 513).

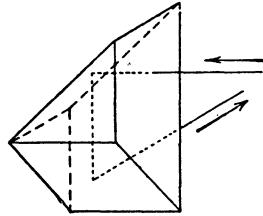
<sup>(2)</sup> *Description d'un spectrophotomètre* (*Annales de Chimie et de Physique*, 5<sup>e</sup> série, t. XXIX; 1883).

<sup>(3)</sup> GARBE, *Note sur un spectroscopie à fente inclinée* (*Journal de Physique*, 2<sup>e</sup> série, t. II, p. 318; 1883).

prismes sont réunis en un seul, constituant ainsi un prisme à double réflexion totale (*fig. 6*), qui peut glisser devant la fente à  $0^{\text{mm}},2$  de distance environ.

La fente et le prisme sont protégés par une boîte en laiton noirci qui présente deux ouvertures : l'une dans le prolongement de l'axe de l'appareil et

Fig. 6.



à la hauteur de la demi-fente libre, l'autre latérale et dont l'axe vient passer au centre de la face du prisme par laquelle pénètrent les rayons. Sur l'une ou l'autre de ces ouvertures peut se visser un double tube qui porte, d'une part, un nicol analyseur fixe ; d'autre part, un nicol polariseur dont les déplacements sont lus sur un cercle vertical.

Le nicol fixe pourrait être placé à l'intérieur du collimateur et derrière la fente ; cette disposition a l'avantage que les deux faisceaux, étant obligés de traverser ce nicol avant d'atteindre les prismes dispersifs, se présentent à la réflexion sur les faces obliques de ceux-ci avec le même plan de polarisation, c'est-à-dire dans des conditions identiques. Mais elle a d'autres inconvénients qui l'ont fait écarter. D'abord, l'interposition d'un système réfringent entre la fente et la lentille du collimateur change le point et aussi les conditions d'achromatisme. En outre, le faisceau ordinaire rejeté par le nicol peut, s'il est intense, illuminer les défauts du spath ou l'intérieur du tube et, par suite, diminuer l'exactitude des observations. Enfin l'application de la loi de Malus dans ces conditions peut être rendue inexacte par le fait de la polarisation elliptique variable que les rayons émanés du nicol mobile éprouvent au moment de leur réflexion totale. On remarquera, cependant, que la double réflexion totale sur des plans rectangulaires entre eux réduit l'ellipticité du rayon à la différence d'ellipticités très voisines, ce qui n'aurait pas lieu avec un prisme réflecteur simple. Quoiqu'il en soit, on a préféré disposer le nicol fixe avant la fente et de façon que sa section principale fût sensiblement verticale. Dès lors, l'ellipticité du rayon, en admettant qu'elle existât encore, n'eût pas modifié son intensité ; et d'ailleurs, la vibration à la

sortie du prisme réflecteur ne différerait pas sensiblement d'une vibration rectiligne horizontale.

Enfin, pour que le faisceau qui avait traversé la demi-fente libre se présentât dans les mêmes conditions aux prismes dispersifs, il suffisait de le faire passer, avant son entrée dans l'appareil, au travers d'un nicol à section principale horizontale. Il était important de s'assurer, avant toute mesure, que les nicols employés étaient assez exactement centrés pour que la rotation du nicol mobile ne modifiât pas le champ lumineux sur la demi-fente correspondante. Pour cela, l'un des nicols étant enlevé, on éclaira les deux parties de la fente au moyen de deux sources constantes et, ayant amené les deux plages à l'égalité, on fit tourner le nicol restant. L'égalité des plages ne fut pas troublée d'une façon appréciable, que l'épreuve eût lieu avec l'un ou avec l'autre des deux nicols. On pouvait être assuré, par suite, qu'aucune perturbation ne se produirait lorsque les deux prismes fonctionneraient ensemble. L'excentricité du faisceau transmis par le nicol mobile entraînerait une erreur d'une autre nature, consistant en ce que les déplacements de l'alidade ne représenteraient plus exactement les rotations du plan de polarisation. M. Bakhuisen (1) a montré qu'il suffit, dans ce cas, de prendre la moyenne de deux observations faites dans deux quadrants opposés. Il en résulte un nouveau mode de vérification du centrage des prismes de Nicol fonctionnant simultanément et qui consiste à établir l'égalité des plages pour deux positions de l'alidade distantes d'environ  $180^\circ$ . L'expérience, faite dans ces conditions, a montré que l'erreur ainsi constatée ne dépasse pas  $10'$ , c'est-à-dire qu'elle est de l'ordre des erreurs d'observation. Il suffira donc, après avoir noté exactement la position d'extinction du nicol, d'établir l'égalité des éclairagements pour une seule position du nicol mobile et de prendre la différence. L'expérience peut ainsi être faite très rapidement, ce qui n'est pas sans importance dans des déterminations de ce genre où les courants qui produisent l'incandescence peuvent varier d'intensité et où l'œil se fatiguerait par des observations trop longues ou trop fréquentes. Les deux prismes de Nicol dont nous venons de parler avaient, d'ailleurs, été construits avec beaucoup de soin par M. J. Duboscq : ce sont des prismes à faces normales aux arêtes et collés à l'huile de lin suivant la disposition imaginée par Prazmowski.

---

(1) *Poggendorff's Annalen*, Bd. CXLV, p. 259.

*Réglage et graduation en longueurs d'onde du spectrophotomètre.*

Le réglage de l'appareil comprend les opérations suivantes, sur lesquelles il est inutile d'insister, bien qu'elles aient, néanmoins, leur importance au point de vue de la précision des mesures :

- 1° Mettre la fente collimatrice au foyer de la lentille ;
- 2° Régler la fente parallèlement aux arêtes des prismes ;
- 3° Que le plan dans lequel se déplace l'axe optique de la lunette soit perpendiculaire à ces arêtes ;
- 4° Placer la fente oculaire, destinée à limiter les plages, parallèlement à ces arêtes.

Une fois l'appareil réglé, il faut le graduer, c'est-à-dire construire la Table qui permettra de passer des positions occupées par la lunette aux longueurs d'onde des radiations qui occupent alors le milieu de la fente oculaire.

On a pris, comme point de départ, la raie du sodium et la division 10 de la graduation oculaire. En effet, pour cette position, l'axe de la lunette est sensiblement dans la direction de l'axe du collimateur et, en outre, les angles des prismes dispersifs ont été calculés de telle sorte que l'appareil fût à vision directe pour la région du spectre comprise entre le jaune et le vert. Il en résulte que la raie du sodium se produit alors vers le milieu du champ. On fait coïncider avec le milieu des deux raies la division 100 du micromètre éclairé que porte latéralement l'appareil, puis on déplace les deux bords de la fente oculaire de façon qu'ils touchent extérieurement les divisions 99 et 101. De cette manière, l'intervalle des raies D se trouve exactement au milieu de la fente, laquelle est fixée définitivement dans cette position. Tout d'abord, on construit la courbe des indications du vernier oculaire en fonction des divisions du micromètre éclairé : cette courbe a été trouvée ici une droite parfaite. Puis on a éclairé la fente du collimateur soit par le Soleil, soit par une flamme chargée de vapeurs métalliques, soit par l'étincelle d'induction jaillissant entre deux électrodes également métalliques. Dans le premier cas, on amenait la fente oculaire à comprendre, en son milieu, les raies noires servant de repères ; dans les deux autres cas, et comme il était bon de pouvoir embrasser d'un coup d'œil le spectre brillant de la vapeur ou de l'étincelle, on avait élargi le champ de l'oculaire et l'on repérait les raies brillantes sur le micromètre éclairé : il suffisait de se reporter à la droite précédemment tracée pour

ramener les indications du micromètre à celles du vernier oculaire. On construit alors la courbe qui avait pour abscisses les positions de ce vernier et pour ordonnées les longueurs d'onde correspondantes. Le Tableau suivant donne les points qui ont servi à la construction de cette courbe :

Longueur d'onde en millièmes de millimètre.	Nature des sources.	Position du vernier oculaire.
$0,7680 \dots \dots \dots$	K (flamme).	6,40
6866.....	Raie B (Soleil).	7,58
6700.....	Li (flamme).	7,88
6562.....	Raie C (Soleil) et H (étincelle).	8,22
6350.....	Sr (flamme).	8,67
5889.....	Raie D (Soleil) et Na (flamme).	10,00
5600.....	Ca (Soleil).	11,05
5404.....	Ti (Soleil).	11,90
5266.....	Raie E (Soleil).	12,58
5172.....	Mg (étincelle).	13,05
4861.....	Raie F (Soleil) et H (étincelle).	15,02
4721.....	Zn (étincelle).	16,12
4607.....	Sr (flamme).	17,10

#### IV. — DISPOSITION GÉNÉRALE DES APPAREILS.

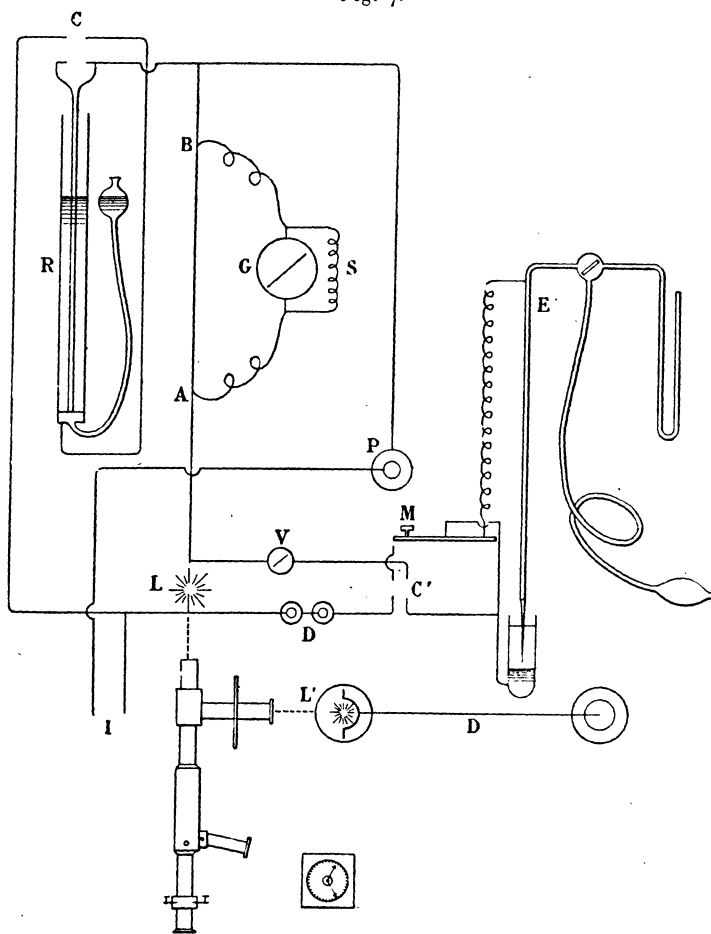
##### *Mesure de l'énergie dépensée.*

La première disposition employée pour la mesure de l'énergie dépensée dans la lampe est représentée *fig. 7*; elle comprend l'électromètre capillaire E. Le courant est fourni par des éléments Bunsen associés en tension et constituant la pile P; on fait varier l'intensité du courant, d'abord en modifiant le nombre des éléments et ensuite par l'emploi d'un rhéostat à mercure R dont les fils peuvent être mis en dérivation, à la fois sur la lampe à incandescence L et le galvanomètre G. Par le jeu d'un commutateur C, on peut employer, pour former cette dérivation, soit un seul des fils du rhéostat, soit les deux fils, en quantité ou en tension. En V est un voltmètre à très grande résistance, quel'on consulte avant de mettre en prise l'électromètre capillaire. Pour cela, on établit un pont en diagonale sur C' et l'on dispose le nombre des daniells d'opposition D de façon que la déviation du voltmètre indique une force électromotrice positive ou négative inférieure à  $0,01, 5$ . On place alors, en conséquence, le commutateur C' de façon à polariser toujours le ménisque par l'hydrogène, puis, abaissant la manette M, on met l'électromètre en prise. Cette manœuvre, pour être faite



avec soin, demandait donc un certain temps et, avec des éléments aussi variables que les bunsens, il ne fallait pas s'attendre à conserver au courant la même valeur pendant l'observation photométrique et pendant la mesure électrique ainsi effectuée. Aussi a-t-on trouvé plus commode et plus sûr de

Fig. 7.



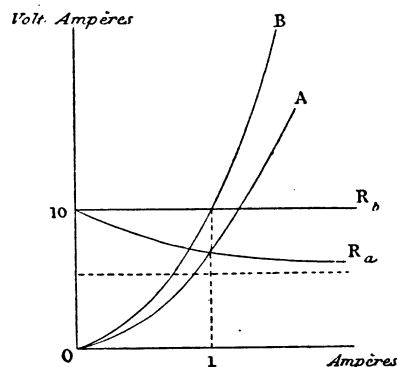
Première disposition des appareils : Lampe Maxim. — Électromètre capill. — Élé. Bunsen.

graduer, une fois pour toutes, la lampe en énergies, c'est-à-dire de construire la courbe qui donne les énergies dépensées dans la lampe en fonction des intensités du courant qui la traverse.

Cette courbe serait une parabole  $y = ax^2$  si la résistance  $a$  de la lampe demeurait constante à toute température ; mais, pour le charbon, on sait que cette résistance diminue à mesure que le filament s'échauffe et, par suite, la courbe réelle sera comprise entre la parabole précédente où  $a$  serait

la résistance à froid, et l'axe des  $x$ . La (*fig. 8*) représente ces deux courbes pour une lampe Maxim dont la résistance à froid était de 10 ohms. A est la

Fig. 8.



courbe réelle, B la courbe  $y = 10x^2$ ,  $x$  étant exprimé en ampères et  $y$  en volt-ampères. Cette courbe A a été construite d'après le Tableau suivant :

19 Mars 1884.

Nombre de bunsens.	Intensités du courant en ampères.	Différences de potentiel en volts.	Énergies en watts.	Résistances de la lampe.
0....	0,000	0,000	0,000	10,000
4....	0,788	0,700	4,495	7,206
»....	0,868	6,204	5,386	7,148
5....	1,020	7,067	7,209	6,919
6....	1,213	8,205	9,959	6,764
»....	1,260	8,428	10,625	7,688
»....	1,265	8,472	10,725	7,687
7....	1,347	8,915	12,293	7,610
7....	1,414	9,307	13,170	7,582
»....	1,474	9,643	14,213	7,544
»....	1,508	9,822	14,820	7,513
»....	1,542	10,027	15,465	7,509
»....	1,656	10,683	17,696	6,445

Sur l'échelle des volt-ampères, on a figuré, en fonction des intensités, les résistances correspondant à chacune de ces deux courbes. Pour l'une, B, la résistance est constante et égale à  $10^{\text{ohms}}$ ; pour l'autre, elle va en diminuant, ainsi qu'on devait s'y attendre. Bien que la connaissance de cette résistance de la lampe, à chaque instant, ne soit pas utile, il a paru bon cependant de la calculer, comme contrôle des déterminations de l'intensité et de la diffé-

rence de potentiel. Il est clair, en effet, que, ses variations devant être régulières, toute anomalie constatée dans ces variations serait l'indice d'une erreur commise dans l'expérience. On peut remarquer, en passant, que la courbe  $R_a$ , qui représente cette résistance, tend à devenir asymptote à une parallèle à l'axe des intensités; elle satisfait, d'ailleurs, assez bien à la relation

$$R = 5,387 + \frac{2,265}{i + 0,49},$$

c'est-à-dire que la résistance de la lampe tend vers une valeur presque moitié de ce qu'elle est à froid. Nous retrouverons plus loin un résultat analogue.

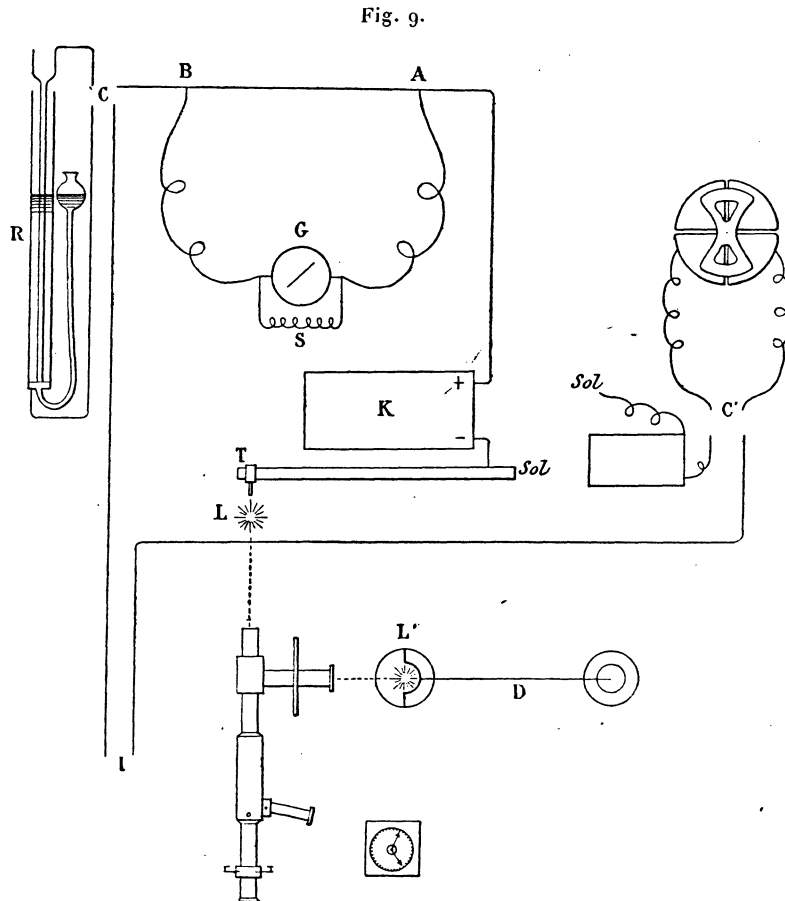
La seconde disposition, avec laquelle ont été faites les déterminations relatives à une autre lampe du genre Swan, est représentée *fig. 9*.

L'électromètre capillaire est remplacé par l'électromètre Thomson, fonctionnant ainsi qu'il a été dit précédemment, et les éléments Bunsen par des accumulateurs. Une des bornes de la lampe à incandescence L communique à l'une des paires de secteurs de l'électromètre, tandis que l'autre borne est reliée au sol par l'intermédiaire d'une forte tringle de laiton dont la résistance est absolument négligeable. C'est à cette tringle qu'aboutit également le pôle négatif de la batterie K des accumulateurs, lequel se trouve ainsi en communication avec le sol. Les accumulateurs employés étaient du type dit Faure-Sellon-Wolkmar et de 40 ampère-heures, c'est-à-dire que chacun d'eux était susceptible de fournir, pendant quarante heures, un courant de 1 ampère avec une force électromotrice voisine de 2 volts. Comme la lampe employée n'exigeait pas 12 volts pour être amenée en pleine incandescence, on avait disposé, dans la boîte K, six de ces appareils et leurs pôles communiquaient à demeure avec les bornes d'un commutateur à 6 éléments de M. Crova, placé sur le couvercle. De cette façon, et par un simple jeu de la clef du commutateur, on pouvait obtenir les combinaisons suivantes :

Tension.	Surface.	Produit.
6	1	6
3	2	6
2	3	6
1	6	6

Il importe, en effet, que la force électromotrice totale du circuit soit de très peu supérieure à la différence de potentiel aux bornes de la lampe; car,

si  $\delta$  est la différence de ces deux quantités pour une intensité  $i$  du courant, il y a en dehors de la lampe une perte  $\delta i$  d'énergie qui est employée uniquement à échauffer les conducteurs. En outre, il est absolument nécessaire



Seconde disposition des appareils : Lampe Swan. — Électromètre Thomson. — Accumulateurs.

que *tous* les accumulateurs participent ensemble, et de la même manière, à l'entretien du courant, ainsi que cela est réalisé par la disposition précédente; sans quoi les uns se videraient, tandis que les autres conserveraient une partie de leur charge, et il deviendrait fort difficile de les recharger simultanément. Enfin il est une circonstance qu'il ne faut pas perdre de vue et qui légitime cette association des éléments en surface, autant que l'expérience le permet : c'est que, pour une charge donnée d'un accumulateur, la fraction de cette charge débitée en régime constant sera d'autant

plus voisine de 1 que la *densité* du courant de décharge à travers les accumulateurs sera plus faible. En d'autres termes, pour avoir un courant bien constant pendant toute sa durée, il faut employer des surfaces très grandes par rapport au courant qui les traverse (1). Dans ces conditions et lorsque la densité ne dépasse pas  $0^{\text{amp}}, 1$  par décimètre carré, la charge presque entière de la pile se débite avec une régularité remarquable. Mais les précautions que nous venons d'indiquer sont indispensables, si l'on veut se garder des mécomptes et tirer des accumulateurs toutes les ressources que ces excellents appareils sont susceptibles de fournir. A la fin de chaque série d'expériences, tous les éléments étaient réunis en surface; de cette façon, si, la batterie étant presque épuisée, la force électromotrice de quelques-uns des accumulateurs avait un peu baissé, ces éléments se rechargeraient lentement sous l'action des autres jusqu'à ce que la force électromotrice fût égale sur tous. C'est toujours après un pareil nivellement qu'on rechargeait les accumulateurs. Pour cela, après les avoir disposés en tension, on amenait aux deux bornes de la batterie les fils d'une machine Gramme type d'atelier, actionnée par un moteur Otto de la force de quatre chevaux; mais, comme la machine n'aurait pas manqué de s'inverser sous l'action de la charge résiduelle des accumulateurs, on ne lançait le courant dans ceux-ci qu'après avoir amorcé la machine sur une résistance auxiliaire faible.

Le débit de la machine marchant à 1000 tours étant trop fort et dangereux pour la conservation des accumulateurs, il a fallu, puisque la vitesse ne pouvait être modifiée, diminuer par un autre moyen la différence de potentiel aux bornes. On y est parvenu d'une façon très simple et très commode en remplaçant le calage fixe des balais par un calage mobile qui permettait d'incliner à volonté le diamètre des points de contact sur la ligne des pôles. En opérant ainsi avec un courant de 4 à 5 ampères, on pouvait juger que la charge des accumulateurs était atteinte lorsque l'eau s'y décomposait tumultueusement; ce qui n'eût pas été un indice suffisant avec un courant de charge plus considérable. Si l'on a insisté aussi longuement sur les précautions à prendre dans la charge et la décharge des piles secondaires, c'est que, dans des expériences de ce genre où les déterminations photométriques ne peuvent pas se faire instantanément, la précision

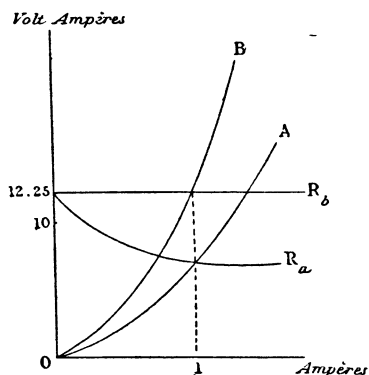
---

(1) CROVA et GARBE, *Sur les régimes de charge et de décharge des accumulateurs* (*Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CI, p. 205).

des mesures tiendra, en grande partie, à la constance du courant. Or il ne paraît pas que, à ce point de vue, aucun générateur soit supérieur aux accumulateurs bien conduits et judicieusement employés. Leur résistance presque nulle, leur force électromotrice considérable, la commodité de leur usage et la facilité de leur conservation sont autant de propriétés qui leur feront substituer aux piles toutes les fois qu'il ne sera pas nécessaire de produire un courant d'une densité trop grande, ce qui est le cas ici.

Avec cette nouvelle disposition il devenait possible de faire, pour chaque observation, les deux déterminations électriques et la mesure photométrique. On a néanmoins construit, pour la lampe Swan, la courbe des énergies, comme on l'avait fait pour la lampe Maxim. La *fig. 10* représente

Fig. 10.



cette courbe, avec la parabole correspondant à la résistance de  $12^{\text{ohms}}, 25$  que la lampe possède à froid. La courbe  $R_a$  des résistances montre que, ici encore, cette résistance, après avoir diminué très rapidement, prend une valeur sensiblement constante ( $6^{\text{ohms}}, 5$ ) et presque égale à la moitié de la résistance à froid. Il semble même, mais le fait aurait besoin d'être confirmé, que cette résistance passe, pour une intensité de  $1^{\text{amp}}, 3$  environ, par un minimum égal à  $6^{\text{ohms}}, 42$ . Quoi qu'il en soit de l'existence de ce minimum, il ne faut pas le confondre avec celui que M. W. Preece a signalé dans les différents types de lampe à incandescence comme caractérisant aux fortes intensités le commencement de la destruction du filament. En effet, la différence de potentiel n'était alors que de  $8^{\text{volts}}$  environ, c'est-à-dire bien inférieure à celle de régime normal; de plus, après plusieurs mois d'expérience, le globe de la lampe n'avait pas noirci. En outre, les mesures directes de résistance, faites de distance en distance, montraient que le filament n'avait

de ce côté, aucune modification. Ainsi, une expérience faite le 4 juillet, c'est-à-dire après cinq mois de fonctionnement, donne, pour résistance la lampe,  $6^{\text{ohms}},42$  au lieu de  $6^{\text{ohms}},44$ , c'est-à-dire une différence faible d'ailleurs, en sens inverse de celle qui résulterait de l'altération du filament. Nous ne voulons pas conclure de ce fait que les lampes à incandescence s'usent pas; mais il y a une différence capitale entre le régime, pour ainsi dire au maximum, d'une lampe en service d'éclairage et le régime d'expérience adopté ici et où la lampe était ménagée avec le plus grand soin.

Il reste un mot à dire sur l'approximation avec laquelle se feront les mesures d'énergie. En désignant cette quantité par  $W$ , par  $E$  et  $I$  la différence de potentiel et l'intensité, on a

$$W = EI.$$

Par suite,

$$\log W = \log E + \log I$$

en différentiant,

$$\frac{dW}{W} = \frac{dE}{E} + \frac{dI}{I}.$$

L'erreur relative d'énergie est la somme des erreurs relatives de  $E$  et de  $I$ .

En effet, d'après ce qui a été dit au sujet de l'électromètre, on trouve  $\frac{dE}{E} = \frac{1}{480}$

pour  $E = 10$  volts environ. On obtient de même, pour  $I = 1$  ampère,  $\frac{dI}{I} = \frac{1}{500}$ .

Ainsi donc  $\frac{dW}{W} = \frac{1}{250}$  environ. C'est de l'ordre de grandeur de la différence constatée plus haut dans la valeur de la résistance.

#### *Mesures de l'intensité lumineuse.*

Le spectrophotomètre, réglé et gradué comme il a été dit (p. 47), était réglé au soleil, c'est-à-dire qu'on déterminait la position du nicol mobile qui amenait l'extinction de l'un des spectres. Dans quelques expériences, on disposait l'alidade au zéro, puis on établissait l'extinction en faisant tourner le nicol à frottement dur dans le tube : les déterminations devant se faire par une seule lecture, il était important que cette position zéro du nicol fût bien exactement fixée. Aussi, pour éviter tout dérangement accidentel, les pièces métalliques étaient soigneusement goupillées et, de plus, on prenait soin de vérifier le zéro avant et après chaque série de mesures.

La fente oculaire étant pointée sur la raie du sodium lorsque le vernier est à la division 10, on règle l'écartement de cette fente; puis, visant directement la lampe à incandescence L (*fig.* 7 et 9) et latéralement la lampe Carcel L' montée sur la balance photométrique D, on tourne le nicol mobile à 65° environ de l'extinction et l'on fait passer dans la lampe le courant le plus intense qui doive la parcourir. Visant alors dans la partie bleue du spectre, on règle la distance aux deux sources, de façon à obtenir l'égalité des plages. Cela fait, on modifie la largeur de la fente collimatrice jusqu'à ce que l'éclat de ces plages soit à peine égal à celui que posséderait la plaque du photomètre Foucault sous l'action d'un carcel placé à 1<sup>m</sup> de distance. Il ne reste plus qu'à terminer le réglage en mettant exactement au point sur la fente et en déplaçant l'appareil devant les sources jusqu'à ce que les plages soient uniformément éclairées et que leur ligne de démarcation soit absolument nette et très fine. L'appareil est alors invariablement fixé dans cette position.

C'est de part et d'autre de cette ligne de démarcation et dans son voisinage que se trouvent les plages qu'il s'agit d'amener à l'égalité par la rotation du nicol. En ce qui concerne cette opération, il est difficile d'indiquer des règles absolues; mais, d'une manière générale, il faut éviter de fatiguer l'œil par une observation trop attentive. Voici comment on opérerait: la lampe Carcel étant en régime normal, on établissait le courant en I et, après avoir placé l'œil de façon à apercevoir dans le champ toute la hauteur des deux demi-fentes, on amenait rapidement, et par trois ou quatre oscillations, le nicol à la position présumée d'égalité. Cela fait, on fermait l'œil, tout en le maintenant en place, et, après un temps de repos, on l'ouvrait brusquement en fixant la ligne de démarcation des plages. En général, on trouvait une différence qui n'aurait pas tardé à s'atténuer par une observation plus prolongée, mais que l'on faisait disparaître aussitôt en déplaçant légèrement le nicol. Puis on fermait l'œil de nouveau et l'on recommençait l'observation en ouvrant et fermant l'œil à intervalles très rapprochés, de façon à modérer l'action sur la rétine, tout en observant d'une manière continue. L'approximation obtenue dans ces mesures ne peut être définie exactement; elle dépend de la sensibilité de l'œil pour les différences: Bouguer avait trouvé  $\frac{1}{64}$  pour la lumière blanche, c'est-à-dire pour le jaune; mais ici, grâce au soin que l'on a pris de délimiter exactement les plages juxtaposées, grâce à l'obturation de ces mêmes plages, on arrive à une sensibilité voisine de  $\frac{1}{100}$ . En réalité, cette sensibilité, constante depuis le rouge jus-



qu'au vert, diminue ensuite considérablement lorsqu'on s'avance vers le violet : nous en avons vu la raison (p. 41). Il se présente même, dans la partie bleue du spectre, une circonstance qui tend à diminuer encore cette sensibilité et qui disparaît lorsque, au lieu de viser directement la ligne de démarcation, on dirige l'œil un peu à côté et sur le prolongement de cette ligne. On trouve l'explication de ce fait assez étrange dans l'observation suivante de M. A. Charpentier (1). Ayant produit une lumière de faible intensité que l'œil aperçoit, *pourvu qu'il ne la regarde pas directement*, il constate que, pour que le même œil la voie directement, cette lumière doit devenir plus intense. Il doit donc exister, au centre de l'œil, une portion de la rétine moins sensible que les parties voisines. Or les expériences anatomiques montrent qu'il existe, en effet, en cet endroit, une portion moins riche que le reste de l'organe en pigment rouge.

Si, comme l'indiquent MM. Macé de Lépinay et Nicati (2), qui ont eu l'occasion d'appliquer cette observation à leurs expériences, cette partie centrale est teintée de jaune, il en résultera que, pour les radiations bleues, elle sera moins sensible aux différences que les parties voisines. En tous cas, et même en admettant simplement un défaut général de sensibilité de la rétine en ce point, on conçoit qu'il y ait avantage, dans ces parties les plus réfrangibles du spectre qui sont toujours les moins intenses, à diriger l'œil non pas sur la ligne même de démarcation, mais à côté et en dehors des plages.

Il importe, maintenant, de nous rendre compte de ce que signifient, au point de vue photométrique particulier auquel nous nous sommes placé, les rotations du nicol mobile établies et mesurées ainsi qu'il a été dit. Désignons par  $i$  l'intensité intrinsèque d'une radiation dans la portion de la source type visée par le nicol; la valeur du champ lumineux produit par cette radiation sur le plan de la fente collimatrice pourra être représentée par l'expression

$$abi \sin^2 \alpha,$$

$\alpha$  étant la déviation du nicol;  $a$  le coefficient, indépendant de la longueur d'onde, par lequel il faut multiplier l'intensité du faisceau pour exprimer les modifications, qu'il a éprouvées et les conditions de production du

---

(1) *Sur la production de la sensation lumineuse (Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences, t. LXXXVI, p. 1343).*

(2) *Annales de Chimie et de Physique, 5<sup>e</sup> série, t. XXX.*

champ (surface de la source lumineuse, distance de cette source à la fente, réflexions éprouvées sur le trajet, etc.);  $b$  un coefficient analogue, mais fonction de la longueur d'onde et relatif, par exemple, aux phénomènes d'absorption subie par le faisceau.

Désignons de même par  $i'$ ,  $\alpha'$ ,  $b'$  les quantités analogues pour la source à étudier; la valeur du champ produit par elle sur la fente sera

$$a' b' i'.$$

Lorsque, par la variation de  $\alpha$ , ces deux champs seront amenés à l'égalité, on aura

$$(1) \quad a' b' i' = a b i \sin^2 \alpha.$$

Or il est clair que cette égalité des champs entraînera l'égalité des deux plages lumineuses juxtaposées devant l'oculaire, et cela quelle que soit, d'ailleurs, la relation qui existe entre la sensation physiologique et l'intensité mécanique de la radiation considérée, quelles que soient aussi les réductions éprouvées par l'un des faisceaux, à l'intérieur du spectrophotomètre, pourvu que l'autre faisceau se présente dans les mêmes conditions que le premier pour subir ces mêmes réductions.

Il résulte de l'égalité (1) deux conséquences :

1° Pour une même radiation, d'intensité variable  $i'$ , cette intensité sera mesurée par  $\sin^2 \alpha$ , si l'on suppose que  $i$  est demeuré constant ou que, par une opération quelconque, on corrige la valeur de  $\sin^2 \alpha$  de cette variation :

$$i' = \frac{a}{a'} \frac{b}{b'} \sin^2 \alpha \times i.$$

2° Il sera possible, par un état donné de la source à étudier, d'exprimer sa composition par rapport à celle de la lampe Carcel, en déterminant les valeurs de  $\alpha$  qui amènent l'égalité dans les différentes régions du spectre. Mais, pour que les valeurs de  $i'$ , ainsi déduites, soient rigoureusement proportionnelles à  $i \sin^2 \alpha$ , il faut que les rapports  $\frac{a}{a'}$ ,  $\frac{b}{b'}$  restent constants lorsqu'on passe d'une radiation à l'autre. Le premier rapport étant, par définition, indépendant de la couleur, il suffit simplement que l'on ait

$$\frac{b}{b'} = \text{const.}$$

Supposons, par exemple, que les deux faisceaux traversent des épaisseurs

$e$ ,  $e'$  d'un même milieu avant de tomber sur l'appareil; les coefficients  $b$  et  $b'$  seront

$$K^e, K^{e'}$$

$K$  étant le coefficient de transmission correspondant à cette radiation. Si  $K_1$  est le coefficient d'une autre radiation, les valeurs de  $b$ ,  $b'$  seront

$$K_1^e, K_1^{e'}$$

Il faut donc que l'on ait

$$\frac{K^e}{K^{e'}} = \frac{K_1^e}{K_1^{e'}} = \dots$$

ou bien

$$K^{e-e'} = K_1^{e-e'} = \dots$$

ou enfin

$$(e - e') \log K = (e - e') \log K_1 = \dots,$$

relation qui ne peut être vérifiée que par

$$K = K_1 = \dots,$$

ce qui est contraire à l'hypothèse d'une absorption variable avec les diverses radiations, ou par

$$e = e'.$$

Ainsi, pour que les valeurs de  $\sin^2 \alpha$  représentent les intensités des différentes radiations dans la lumière considérée en fonction des intensités de ces mêmes radiations dans la source type, il faut et il suffit que les épaisseurs des différents milieux traversés par les deux faisceaux, avant de tomber sur la fente, soient égales entre elles deux à deux. Nous verrons, à propos de cette comparaison des sources, comment on a satisfait à la condition précédente.



## SECONDE PARTIE.

RÉSULTATS ET FORMULE. — ÉTUDE DES CONSTANTES DE LA FORMULE.

### I. — RÉSULTATS ET FORMULES.

#### *Tableaux des mesures.*

Les Tableaux qui suivent indiquent les premiers résultats obtenus avec une lampe Maxim, dont la Table de graduation, établie au moyen de l'électromètre de M. Lippmann, a été donnée plus haut (p. 50). L'énergie électrique est donc fournie par une seule lecture, celle du galvanomètre dont on note le zéro à chaque observation. Un premier Tableau contient l'ordre des mesures, la position et le zéro du galvanomètre relatifs à une détermination : la différence de ces deux nombres donne la déviation. La quatrième colonne contient la valeur en ampères de l'intensité du courant, et la dernière la valeur en volt-ampères de l'énergie correspondante.

Un second Tableau contient les résultats des mesures photométriques. La première colonne reproduit l'ordre des observations, la seconde en donne l'heure. Dans la colonne suivante, on a porté, sous la rubrique *correction*, l'intervalle de temps  $\theta$ , en secondes, des deux déclenchements de la lampe Carcel qui comprennent cette observation (1). En divisant par ce nombre la valeur de  $\sin^2 \alpha$ , on affranchit la mesure des variations du carcel, c'est-à-dire que les intensités de la source à étudier se trouvent rapportées ainsi à un carcel idéal brûlant 5<sup>gr</sup> d'huile à la seconde. La quatrième colonne contient l'un au-dessus de l'autre, et pour chaque expérience, la position moyenne et le zéro du nicol : la différence de ces nombres donne  $\alpha$  qui est porté dans la colonne suivante. Enfin la colonne des intensités contient, comme intensités observées, les valeurs de  $\frac{2 \sin^2 \alpha}{\theta}$  et, en regard, ces intensités calculées d'après une formule qui sera donnée plus loin et dont les constantes  $a, b, c$  sont données en tête du Tableau des mesures électriques.

---

(1) Un petit Tableau additionnel donne la marche du carcel, c'est-à-dire l'heure de ces déclenchements successifs pour 5<sup>gr</sup> d'huile consommés.

## Expérience du 17 avril 1884.

Micromètre à 15,0,  $\lambda = 0^{\mu},486$  (raie F), $a = 0,08226$ ,  $b = 2,93$ ,  $c = 3,20$ .

	Galvanomètre.			Intensités en ampères.	Énergies en volt-ampères.
	Position.	Zéro.	Déviati.on.		
I.....	366,8	232,6	134,2	1,368	12,45
II.....	365,7	235,3	130,4	1,330	11,82
III.....	355,5	236,8	118,7	1,210	9,91
IV.....	347,0	236,9	110,1	1,123	8,67
V.....	339,4	236,8	102,6	1,046	7,55
VI.....	328,6	237,0	91,6	0,934	6,10

	Heure de l'observation.	Correction $\theta$ .	Intensités lumineuses			Signe de la différence O.—C.	
			Nicol.	$\alpha$ .	obs. = $\frac{2 \sin^2 \alpha}{\theta} \times 10^6$ .		calculées.
I.....	h m 12.24	411	165.30 106. 0	59.30	361,3	361,1	+
II.....	37	413	156.45 106. 0	50.45	290,1	290,0	+
III.....	51	410	137.35 106. 0	31.35	133,6	135,6	—
IV.....	1. 0	412	129. 0 106. 0	23. 0	74,0	72,3	+
V.....	17	417	122.15 106. 0	16.15	37,4	37,8	—
VI.....	33	419	115. 0 106. 0	9. 0	11,6	11,6	0

## Marche du cercel.

h m s	h m s	h m
12.20.10	12.54.23	1.28.50
27. 1	1. 1.15	35.49
33.49	8. 6	42.47
40.42	15. 0	
47.33	21.57	

Expérience du 9 avril 1884.

Micromètre à 11,9,  $\lambda = 0^{\mu},540,$

$a = 0,184,$   $b = 3,09,$   $c = 2,77.$

	Galvanomètre.			Intensités en ampères.	Énergies en volt-ampères.
	Position.	Zéro.	Déviat.ion.		
I.....	378,7	238,6	140,1	1,429	13,43
II.....	370,5	238,0	132,5	1,351	12,20
III.....	363,5	237,0	126,5	1,290	11,16
IV.....	351,3	236,3	115,0	1,173	9,39
V.....	344,9	235,7	109,2	1,113	8,53
VI.....	341,1	234,7	106,4	1,085	8,10
VII.....	336,0	233,8	102,2	1,042	7,50
VIII.....	323,6	233,6	90,0	0,918	5,90

Heure de l'observation.	Correction 0.	Nicol.	$\alpha.$	Intensités lumineuses		Signe de la différence O.—C.
				obs. = $\frac{2 \sin^2 \alpha}{\theta} \times 10^2.$	calculées.	
I.....	h m 11.35	175.40 <sup>0</sup> 106. 0	69.40	394,1	393,6	+
II.....	44	156. 5 106. 0	50. 5	263,1	269,0	—
III.....	58	146.45 106. 0	40.45	191,0	196,0	—
IV.....	12.11	134. 0 106. 0	28. 0	100,2	99,0	+
V.....	19	128.25 106. 0	22.25	65,9	65,9	0
VI.....	28	126. 5 106. 0	20. 5	52,8	54,8	—
VII.....	36	123.15 106. 0	17.15	39,6	38,0	+
VIII.....	42	115.10 106. 0	9.10	11,40	11,43	—

Marche du cercel

h m	h m s	h m s
11.30.24	12. 0. 7	12.29.42
37.50	7.31	37. 6
45.16	14.54	44.31
2.43	22.17	

## Expérience du 8 avril 1884.

Micromètre à 10,0,  $\lambda = 0^{\mu},5888$  (raie D).

$$a = 0,284, \quad b = 2,73, \quad c = 2,56.$$

	Galvanomètre.			Intensités en ampères.	Énergies en volt-ampères.
	Position.	Zéro.	Déviati.on.		
I.....	367,0	236,7	130,3	1,329	11,80
II.....	363,5	237,1	126,4	1,289	11,10
III.....	359,2	237,9	121,3	1,237	10,30
IV.....	353,7	239,0	114,7	1,169	9,30
V.....	348,1	239,2	108,9	1,110	8,45
VI.....	345,8	239,4	106,4	1,085	8,10
VII.....	341,5	240,0	101,5	1,035	7,40
VIII.....	330,0	240,1	89,9	0,917	5,90
IX.....	326,2	240,2	86,0	0,877	5,47
X.....	324,3	240,3	84,0	0,856	5,21
XI.....	320,8	240,3	80,5	0,821	4,83

## Expérience complémentaire.

XII.....	378,8	240,3	138,5	1,412	13,20
----------	-------	-------	-------	-------	-------

	Heure de l'observation.	Correction $\theta$ .	Nicol.	$\alpha$ .	Intensités lumineuses		Signe de la différence O.—C.
					obs. = $\frac{2 \sin^2 \alpha}{\theta} \times 10^4$ .	calculées.	
I.....	6.32	419	153.30 106. 0	47.30'	259,6	258,0	+
II.....	37	418	148. 0 106. 0	42.10	215,5	216,5	—
III.....	46	416	142. 0 106. 0	36. 0	166,0	166,0	o
IV.....	56	412	135. 0 106. 0	29. 0	114,0	115,0	—
V.....	7. 3	414	130.20 106. 0	24.20	81,6	80,4	+
VI.....	10	415	128.10 106. 0	22.10	68,4	69,3	—
VII.....	17	416	125.10 106. 0	19.10	51,6(?)	48,8	+
VIII.....	26	416	117.10 106. 0	11.10	18,0	18,0	o
IX.....	32	418	115. 5 106. 0	9. 5	11,9	12,1	—
X.....	37	418	113.50 106. 0	7.50	8,9	9,4	—
XI.....	47	418	112.35 106. 0	6.35	6,2	6,1	+

## Expérience complémentaire.

XII.....	58	420	168.30 106. 0	62.30	374,7	374,7	o
----------	----	-----	------------------	-------	-------	-------	---

## Marche du carcel.

h m s	h m s	h m s
6.25.33	7. 0.12	7.34.51
32.32	7. 6	41.49
39.30	14. 1	48.47
46.26	20.57	55.47
53.20	27.53	8. 2.47