

DESCRIPTION ET EMPLOI D'UN NOUVEAU MICROPHOTOMÈTRE ;

Par MM. CH. FABRY et H. BUISSON.

1. La plaque photographique, depuis longtemps employée à l'enregistrement de la forme des images optiques, peut aussi, mais plus difficilement, servir à la mesure de l'intensité d'un rayonnement (photométrie photographique). En dehors de ses avantages ordinaires, production de documents durables, enregistrement simultané d'un grand nombre de phénomènes, intégration de l'action en fonction du temps, la photographie présente encore celui de s'appliquer à des domaines inaccessibles à l'œil, ultra-violet et même commencement de l'infra-rouge.

Pour ces mesures photographiques d'intensité, on est amené à déterminer l'opacité produite après développement en différentes régions d'une plaque ; la mesure, dans beaucoup de cas, doit porter sur des régions très étroites (raies spectrales). Le problème à résoudre consiste donc dans la détermination de l'opacité d'une très petite région d'une lame ; c'est un problème de photométrie visuelle qui, une fois résolu, peut recevoir diverses applications.

Ce problème a été étudié depuis longtemps. Hartmann ⁽¹⁾ a construit un appareil fréquemment employé dans les recherches de photométrie astronomique, qui présente un grave inconvénient : les deux plages photométriques sont des images nettes de la plaque à mesurer et d'une plaque de comparaison ; elles ne sont pas d'aspect uniforme, on y voit les images des grains d'argent des plaques. L'égalisation photométrique est, dans ces conditions, très incertaine. Le défaut est surtout grave lorsque la mesure porte sur une très petite surface, ce qui oblige à employer un fort grossissement.

Ayant eu à faire des mesures de photométrie photographique au cours d'études sur l'absorption dans l'ultra-violet, nous avons été amenés à construire un appareil qui ne présente pas cet inconvénient et donne des plages photométriques parfaitement uniformes ⁽²⁾.

⁽¹⁾ HARTMANN, *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, t. XIX, p. 97 ; 1899.

⁽²⁾ Cet appareil a été réalisé en 1912 ; il a été présenté à la Société de Physique (séance du 17 janvier 1913) et sommairement décrit dans les *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* (t. LCIV, p. 389 ; 3 février 1913). Dans le *Zeitschrift für Instrumentenkunde* (t. XXXIV, p. 91 ; 1914), M. Krüss a donné une analyse de notre note. L'auteur n'a malheureusement pas compris la disposition ni même le prin-

2. Rappelons d'abord les définitions des quantités à mesurer.

Sur une plaque photographique développée, et plus généralement sur une lame absorbante quelconque, considérons une région uniforme. Pour définir son état de noircissement, on la fera traverser par un faisceau lumineux et l'on comparera l'intensité I du faisceau incident à l'intensité T du faisceau transmis. Le rapport

$$0 = \frac{I}{T},$$

prend le nom d'opacité. La valeur 1 correspond à une plaque parfaitement transparente.

Au lieu de cette quantité, il est beaucoup plus commode d'employer son logarithme (pris dans le système de base 10 ou logarithme vulgaire) qui porte le nom de densité. Désignant cette quantité par D , on aura :

$$D = \log 0 = \log \frac{I}{T}.$$

Une plaque parfaitement transparente a pour densité zéro ; la densité 1 indique que la plaque laisse passer $\frac{1}{10}$ de la lumière incidente. Les densités jouissent des propriétés suivantes qui résultent de la définition :

Si l'on superpose plusieurs plaques, leurs densités s'ajoutent. Les densités croissent comme la quantité de substance absorbante par unité de surface.

Les densités peuvent être mesurées en se servant de diverses lumières monochromatiques ; en général on trouvera des valeurs légèrement différentes. Les propriétés énoncées plus haut ne sont rigoureusement vraies que pour une même lumière monochromatique. Il y a donc tout avantage à faire les mesures de densité en lumière

cipe de notre appareil, ce qui l'a conduit à élever des objections qui ne sont nullement fondées.

D'autre part, M. J. Baillaud a construit un appareil, qu'il a désigné sous le nom d'opacimètre, et qui est basé sur un principe analogue (*Comptes Rendus*, t. LCVI, p. 113 ; 13 janvier 1913). Le procédé d'éclairage est différent et donne dans le champ photométrique une luminosité beaucoup moins grande que celle que nous obtenons, ce qui n'est pas sans inconvénient lorsqu'on mesure de fortes opacités.

M. Chrétien a donné aussi, à la même époque, le principe d'un appareil analogue (*Bulletin de la Société astronomique de France*, février 1913).

homogène plutôt qu'en lumière blanche ; on mesure ainsi un phénomène obéissant à des lois simples et l'on évite les difficultés inhérentes à la photométrie hétérochrome. La mesure en lumière monochromatique est très facile en employant la lumière de la lampe à vapeur de mercure, réduite à sa radiation verte au moyen de filtres convenables.

Un procédé commode pour obtenir l'égalisation photométrique consiste à employer une lame dont la densité varie d'un point à l'autre suivant une loi connue. Une telle lame porte le nom de coin photométrique. Elle peut être obtenue en développant une plaque photographique qui a subi une impression régulièrement croissante

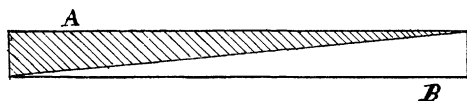


FIG. 1.

d'un bord à l'autre. Sa courbe de densité doit être déterminée par des mesures photométriques préalables ⁽¹⁾. Il est plus commode d'employer un coin dont la loi de densité soit connue *a priori*, et cela est facile lorsqu'on se sert de lumière monochromatique. Il peut être formé d'une lame A de verre absorbant (*fig. 1*) taillée en forme de prisme aigu, accolée à une lame B de verre transparent de même forme, mais tournée en sens inverse. On a ainsi une épaisseur absorbante croissant d'un bord à l'autre et, si les surfaces sont correctement taillées et le verre homogène, la densité mesurée en lumière monochromatique variera suivant une loi exactement linéaire en fonction de la distance à un point fixe. Il suffira de mesurer les den-

¹⁾ Divers procédés peuvent être employés pour obtenir, sur une plaque photographique, cette teinte dégradée. Nous avons quelquefois employé le suivant, qui est très simple : la plaque est exposée à la lumière d'une lampe au mercure, en interposant devant elle une cuve en forme de prisme très aigu contenant une solution faible de chromate neutre de potassium. L'intensité de la radiation violette, qui est à peu près la seule agissante, est ainsi progressivement décroissante d'un bord à l'autre de la plaque, et après développement on obtient un coin dont la courbe de densité n'est pas très différente d'une ligne droite.

M. King obtient l'éclaircissement dégradé en utilisant un phénomène de pénombre produit par une source et un écran de formes convenables.

Enfin, les écrans de M. Goldberg sont obtenus en coulant de la gélatine contenant un absorbant entre deux lames de verre formant coin.

sités en deux points seulement au lieu d'avoir à faire de nombreuses déterminations pour tracer une courbe de graduation. De plus, l'inconvénient de se reporter à une courbe de graduation disparaît et les mesures sont beaucoup plus rapides ⁽¹⁾.

3. Principe de l'appareil et marche des rayons. — La *fig. 2* représente une coupe schématique de notre appareil par un plan vertical. Un faisceau unique de lumière provenant de la lampe au mercure S diaphragmée par une petite ouverture A se divise en deux parties qui vont traverser respectivement la plaque à mesurer H et le coin photométrique W. Une très petite image de l'ouverture éclairée A est projetée sur chacune de ces deux lames ; la mesure portera ainsi sur une très petite étendue de la plaque photographique, et d'autre part la densité du coin aura une valeur parfaitement définie. Les deux faisceaux tombent ensuite sur un cube de Lummer et Brodhun K et viennent finalement former en un même point B deux images confondues de l'ouverture A, sur laquelle se trouvent aussi au point l'image de la plaque photographique et celle du coin. C'est en ce point B que l'observateur place son œil qui ne verra que les plages photométriques et non pas le grain de la plaque, puisque celui-ci se trouvera projeté sur sa pupille.

La figure permet de suivre la marche de la lumière. Le faisceau issu de l'ouverture A traverse la lentille O qui le rend parallèle. La moitié de ce faisceau, après avoir traversé la lentille L_2 et s'être réfléchi sur le prisme à réflexion totale R_2 , va converger sur la plaque photographique H au point A_2 où se forme ainsi une très petite image du trou éclairant. Par réflexion sur la partie réfléchissante du cube K, la lentille L'_2 redonne une nouvelle image de A au point B.

L'autre moitié du faisceau suit une marche analogue. Après qu'il s'est réfléchi sur les deux prismes R_1 et R'_1 , la lentille L_1 le fait converger en une image A_1 du trou sur le coin photométrique W. La

(1) On trouve dans le commerce des verres désignés sous le nom de verres absorbants neutres, c'est-à-dire dont l'absorption serait la même pour toutes les radiations. Cette condition est loin d'être réalisée. Le verre d'origine allemande qui a servi à la construction de nos coins donne les valeurs suivantes de la densité pour une même épaisseur :

Radiation rouge ($\lambda = 6.400$) 0,88 ;

Radiation verte ($\lambda = 5.460$) 1,00 ;

Radiation violette ($\lambda = 4.360$) 1,28.

Ces écarts sont tout à fait indifférents lorsqu'on se sert, comme nous le faisons, d'une seule radiation monochromatique.

lentille L'_1 en redonne une image définitive au point B à travers la partie transparente du cube.

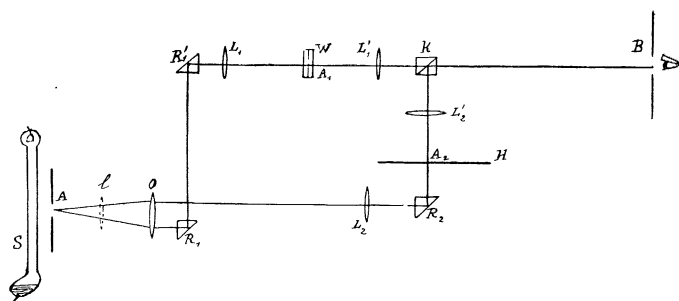


FIG. 2.

En résumé, on a en B deux images de A identiques et en coïncidence, l'une formée par les rayons qui ont traversé la plaque photographique et se sont réfléchis dans le cube, l'autre par les rayons qui ont traversé le coin et ont passé à travers le cube. Dans cette double image se trouvent aussi les images des portions de la plaque et du coin qui ont été découpées par les faisceaux. Le grain des plaques se trouve au point sur cette image finale.

On dispose en B un écran percé d'une ouverture plus petite que l'image du trou éclairant, derrière laquelle on place l'œil. On voit alors les deux plages adjacentes du cube toutes deux parfaitement uniformes; on égalise leurs éclairéments en déplaçant le coin photométrique, dont les positions sont lues sur une échelle divisée. Comme on ne mesure jamais que des rapports d'opacités (différences de densités), il est indifférent que l'un des faisceaux ait subi, par réflexion ou autrement, un affaiblissement constant plus grand que l'autre.

L'observateur ne voit pas l'image de la plaque photographique qu'il mesure; il est donc nécessaire qu'un dispositif accessoire lui permette de la mettre en place. Il suffit pour cela d'enlever le diaphragme placé en B et de regarder avec une loupe l'image agrandie de la plaque photographique qui est projetée en B. On amène le point que l'on désire étudier exactement à la place voulue, place qui est marquée par l'encadrement de quatre fils formant réticule; le diaphragme B, lorsqu'on le remet en place, vient se centrer exactement sur ces mêmes fils. Pour faciliter l'examen et la mise en place de la plaque, il est commode d'en éclairer une surface plus grande

que l'image A_1 ; on y arrive en interposant entre A et O une lentille l qui change la convergence du faisceau.

La densité maximum du coin est d'environ 2. Pour mesurer des densités supérieures à cette valeur, on interpose devant la lentille L_1 une lame absorbante à faces parallèles dont la densité connue s'ajoute à celle du coin.

4. Réalisation matérielle. — Telles sont les dispositions optiques de l'appareil. Un premier modèle a été réalisé au laboratoire; un modèle très peu différent, qui a été construit par M. Jobin, est représenté par la *fig.* 3. Les pièces y sont désignées par les mêmes lettres que dans la figure précédente.

Le cliché photographique à mesurer est simplement posé sur le cadre horizontal que l'on voit au-dessous de la lentille L'_2 ; les dimensions du cadre sont 13×18 centimètres, et l'on peut y poser des plaques de dimensions plus grandes ou plus petites. Il est susceptible de deux déplacements rectangulaires dans son propre plan, guidés au moyen de glissières et actionnés par deux crémaillères et pignons; deux échelles divisées en millimètres donnent les déplacements suivant les deux directions, ce qui peut être utile pour l'identification des points mesurés.

Le coin photométrique, que l'on voit entre les lentilles L_1 et L'_1 , peut glisser horizontalement; son mouvement est commandé par une crémaillère au moyen du bouton D que l'observateur tient à la main. Sa course est de 10 centimètres. Pour mesurer les déplacements du coin, le même patin mobile porte une échelle divisée observée au moyen d'une lunette, visible sur la figure à côté de B. L'observateur n'a qu'à déplacer légèrement son œil pour voir l'échelle et lire la division qui se trouve sur le fil vertical de la lunette.

Si l'échelle est divisée en millimètres, il suffit de connaître le facteur de proportionnalité entre le déplacement du coin et la densité. Il est plus commode de faire une échelle telle que la valeur de la densité y soit lue directement. Dans notre appareil la distance entre deux divisions consécutives vaut $0^{\text{mm}},36$ et correspond à un accroissement de 0,01 sur la densité.

Pour mettre exactement en place le point du cliché que l'on veut mesurer, on doit examiner son image réelle à l'aide d'un oculaire qui se substitue au diaphragme B. Cette substitution se fait par glisse-

ment d'une plaque qui porte à la fois le diaphragme et l'oculaire; la position représentée sur la figure est celle où l'on se sert de l'oculaire. L'observateur voit alors le cliché dans un microscope coudé réalisé par la lentille L'_2 fonctionnant comme objectif et l'oculaire B. On voit dans le champ le carré des quatre fils sur lequel on centre le point du cliché à mesurer. Dans cet examen, il est commode d'interposer la lentille l destinée à accroître la plage éclairée⁽¹⁾; on la manœuvre au moyen du levier C.

L'observation photométrique se fait en mettant l'œil directement derrière le diaphragme B, dont l'ouverture doit venir se centrer exactement sur les quatre fils. On règle une fois pour toutes la position de l'ouverture sur la plaque mobile au moyen des deux vis b, b' , et elle prend alors automatiquement sa place en poussant la plaque à fond de course.

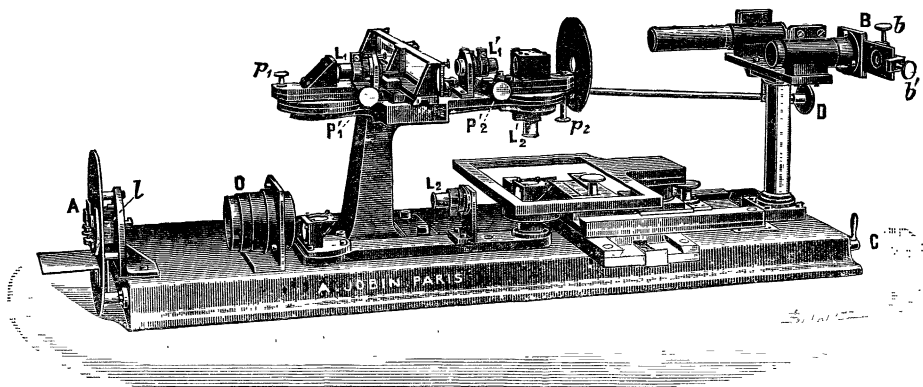


FIG. 3.

L'ouverture du diaphragme B doit toujours être plus petite que la pupille. D'autre part, c'est sa dimension qui détermine la portion du cliché sur laquelle porte la mesure. La lentille L_2 projetant une image du cliché agrandie environ cinq fois, la portion utilisée de la plaque aura une surface vingt-cinq fois plus petite que cette ouverture. Celle-ci peut être un cercle de $0^{\text{mm}},5$ de diamètre; la mesure est alors faite sur une plage qui n'a que $0^{\text{mm}},1$ de diamètre. On peut employer un diagramme à ouverture rectangulaire, par exemple

(1) Dans la figure, cette lentille est représentée beaucoup trop près de l'ouverture éclairante.

dans le cas où l'on a à faire des mesures sur des raies spectrales.

Avant de se servir de l'appareil quelques réglages, faits une fois pour toutes, sont nécessaires. Les lentilles L_2 et L_1 doivent être fixées de manière à projeter des images nettes du trou éclairant sur la plaque photographique et sur le coin. Les lentilles L'_2 et L'_1 seront placées de manière à projeter de nouveau ces images et en même temps la plaque et le coin sur l'ouverture du diaphragme B. Ces deux images finales du trou éclairant seront de plus amenées en coïncidence sur le carré de fils, en agissant sur l'orientation du prisme R'_1 d'une part et du cube K d'autre part, à l'aide des vis p_1 et p'_1 pour le premier et des vis p_2 et p'_2 pour le second. On s'assurera de ces réglages en utilisant l'oculaire B. Le diamètre du trou éclairant A devra être choisi de telle manière que son image finale déborde toujours l'ouverture du diaphragme B.

Le champ photométrique, grâce au mode rationnel d'éclairage employé, est très lumineux. Il n'est pas même nécessaire de faire l'obscurité dans la salle pour mesurer sans difficulté des densités atteignant 2. Avec quelques précautions, on mesure des densités dépassant 4, ce qui correspond à une proportion de lumière transmise inférieure à un dix-millième.

5. Source de lumière. — On a expliqué plus haut les avantages de la lumière monochromatique dans les mesures de densité. Nous employons la lampe à vapeur de mercure Cooper Hewitt, en interposant, entre la lampe et l'ouverture éclairante, un verre jaune et une cuve d'un sel de didyme pour réduire le rayonnement à la raie verte.

Les mesures en lumière blanche ne conservent un sens précis que si le coin et la plaque sont tous deux parfaitement neutres, c'est-à-dire exercent la même absorption sur toutes les radiations, condition rarement réalisée.

6. Étalonnage du coin. — Chaque observation photométrique consiste à égaliser les deux plages en faisant glisser le coin, et se traduit par une lecture faite sur l'échelle qui en mesure les déplacements. Pour passer de cette lecture à la densité, il faut avoir tracé la courbe de graduation du coin, donnant les densités ⁽⁶⁾ en fonction des lectures sur l'échelle.

⁽⁶⁾ Ou plutôt les différences de densités, car on opère toujours par différence, et les valeurs absolues sont indifférentes.

Lorsqu'on emploie, comme nous le faisons, de la lumière monochromatique et un coin prismatique en verre absorbant, on sait d'avance que cette courbe est exactement une droite, et l'opération se réduit à la détermination d'une constante qui en caractérise l'inclinaison. Il suffit pour cela de déterminer la différence de densité en deux points connus du coin, ou plus simplement de chercher de combien il faut le déplacer pour maintenir l'équilibre photométrique lorsqu'on affaiblit un des faisceaux dans un rapport connu. Les divers procédés de graduation de la lumière peuvent être employés (disque tournant, Nicols, etc.). Nous nous servons de lames absorbantes uniformes dont on a mesuré la densité par une méthode photométrique directe, en se servant de la même lumière monochromatique que celle qui est employée dans toutes les autres mesures. Nous avons mesuré les densités de nos lames par une méthode polarimétrique. Elles constituent de véritables étalons de densité qui servent à l'étude de tous les coins photométriques. Une seule suffit pour cet étalonnage; il est préférable d'en employer plusieurs à titre de vérification.

Nos lames sont faites en verre absorbant taillé en lames à faces parallèles de 2 centimètres de côté; leurs épaisseurs sont telles que leurs densités vont de 0,4 à 2. On peut d'ailleurs en obtenir autant que l'on veut au moyen de plaques photographiques uniformément impressionnées.

Les coins obtenus par photographie ou par tout autre procédé qui ne donne pas une loi d'absorption connue *a priori* doivent être étalonnés point par point. Le microphotomètre, muni d'un coin en verre absorbant, rend cette opération très facile.

7. Usages divers du microphotomètre. — Notre appareil a été construit en vue de mesures photographiques d'intensité dans des spectres, et pour cela il était très important de faire la mesure sur une très petite surface sans cesser d'obtenir des plages photométriques uniformes. On a vu que la mesure peut être faite sur une surface, ronde ou rectangulaire, de moins de $0^{\text{mm}^2},01$.

Dans certains cas, il peut être utile de faire porter la mesure sur une surface plus grande. Le diaphragme placé devant l'œil peut être agrandi, sans cependant dépasser l'ouverture de la pupille; en lui donnant un diamètre de 3 millimètres, on fera porter la mesure sur un cercle de $0^{\text{mm}},6$. Pour aller au delà, on peut employer l'artifice

suivant : au lieu de regarder à l'œil nu à travers le diaphragme B, on dispose à la suite de ce diaphragme, largement ouvert, une petite lunette grossissant environ cinq fois, avec laquelle on observe les plages photométriques. L'image agrandie du cliché qui se faisait en B où est maintenant l'objectif de la lunette se reporte rapetissée à l'anneau oculaire, où elle est à peu près en vraie grandeur par rapport au cliché. La mesure porte alors sur un cercle de diamètre égal à celui de l'anneau oculaire. On arrive ainsi à prendre sur le cliché un cercle de 3 millimètres de diamètre.

Enfin, revenant à la disposition habituelle, pour mesurer la densité d'une lame uniforme sur une assez grande étendue, on peut l'interposer en une région quelconque du faisceau, de préférence dans la région où il est parallèle, c'est-à-dire entre les lentilles O et L_2 .

Le microphotomètre peut ainsi être employé pour toutes les mesures de noircissement photographique, soit pour l'étude des qualités des plaques, soit en vue de déterminations photométriques intéressant la Physique pure ou l'Astronomie. Il peut, de plus, servir pour toutes les déterminations d'absorption en lumière monochromatique, par exemple celle d'un bloc de verre ou d'un liquide contenu dans une cuve à faces parallèles. Nous l'employons aussi pour mesurer la transparence des argentures utilisées dans les appareils interférentiels, donnée qu'il est très utile de connaître pour proportionner les épaisseurs d'argent à l'intensité des lumières à étudier.
