

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- Le Conservatoire numérique communément appelé le Cnum constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi nº 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - https://cnum.cnam.fr](https://cnum.cnam.fr))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment possible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

NOTICE DE LA REVUE	
Auteur(s) ou collectivité(s)	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Auteur(s)	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Titre	Publication : Laboratoire d'essais
Adresse	Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 193.-195.
Nombre de volumes	125
Cote	CNAM-BIB P 1329-B et P 1329-C
Sujet(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France) Génie industriel -- 20e siècle
Note	La collection comporte des lacunes : n°24; n°58; n°63; n°67; n°76-n°77
Notice complète	https://www.sudoc.abes.fr/cbs//DB=2.1/SET=17/TTL=3/REL ?PPN=261820893&RELTYP=NT
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B_P1329-C
LISTE DES VOLUMES	
	N°25 (1936)
	N°26 (1937)
	N°27 (1937)
	N°28 (1937)
	N°29 (1938)
	N°30 (1939)
	N°31 (1936)
	N°32 (1938)
	N°33 (1938)
	N°34 (1938)
	N°35 (1938)
	N°36 (1938)
	N°37 (1938)
	N°38 (1938)
	N°39 (1938)
	N°40 (1939)
	N°41 (1939)
	N°42 (1939)
	N°43 (1939)
	N°44 (1939)
	N°45 (1938)
	N°46 (1940)
	N°47 (1940)
	N°48 (1940)
	N°49 (1940)
	N°50 (1940)
	N°51 (1941)
	N°52 (1941)
	N°53 (1941)
	N°54 (1941)
	N°55 (1942)
	N°56 (1942)
	N°57 (1942)
	N°59 (1942)

	N°60 (1941)
	N°61 (1942)
	N°62 (1943)
	N°64 (1943)
	N°65 (1943)
	N°66 (1943)
	N°68 (1943)
	N°69 (1943)
	N°70 (1943)
	N°71 (1943)
	N°72 (1944)
	N°73 (1943)
	N°74 (1944)
	N°75 (1944)
	N°78 (1944)
	N°79 (1944)
	N°80 (1944)
	N°81 (1944)
	N°82 (1944)
	N°83 (1944)
	N°84 (1944)
	N°85 (1944)
	N°86 (1945)
	N°87 (1945)
	N°88 (1945)
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	N°89 (1945)
	N°90 (1945)
	N°91 (1945)
	N°92 (1945)
	N°93 (1945)
	N°94 (1945)
	N°95 (1946)
	N°96 (1946)
	N°97 (1946)
	N°98 (1944)
	N°99 (1945)
	N°100 (1945)
	N°101 (1946)
	N°102 (1946)
	N°103 (1946)
	N°104 (1946)
	N°105 (1946)
	N°106 (1946)
	N°107 (1947)
	N°108 (1947)
	N°109 (1947)
	N°110 et 111 (1947)
	N° 112 (1947)
	N° 113 (1947)
	N° 114 (1947)
	N° 115 (1947)
	N° 116 (1947)
	N° 117 (1947)
	N° 118 (1948)
	N° 119 (1948)
	N° 120 (1948)
	N° 121 (1948)
	N° 122 (1947)

	N° 123 (1948)
	N° 124 (1948)
	N° 125 (1948)
	N° 126 (1948)
	N° 127 (1948)
	N° 128 (1948)
	N° 129 (1948)
	N° 130 (1949)
	N° 131 (1949)
	N° 132 (1949)
	N° 133 (1948)
	N° 134 (1949)
	N° 135 (1948)
	N° 136 (1949)
	N° 137 (1950)
	N° 138 (1950)
	N° 139 (1950)
	N° 140 (1950)
	N° 141 (1950)
	N° 142 (1948)
	N° 143 (1950)
	N° 144 (1950)
	N° 145 (1951)
	N° 146 (1951)
	N° 147 (1951)
	N° 148 (1951)
	N° 149 (1951)
	N° 150 (1951)
	N° 151 (1951)
	N° 152 (1951)
	N° 153 (1952)
	N° 154 (1952)
	N° 155 (1952)

NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
Auteur(s) volume	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Titre	Publication : Laboratoire d'essais
Volume	N°89 (1945)
Adresse	Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 1945
Collation	1 vol. (p. [97-108]) : ill. ; 27 cm
Nombre de vues	16
Cote	CNAM-BIB P 1329-C (10)
Sujet(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France) Génie industriel -- 20e siècle
Thématique(s)	Histoire du Cnam
Typologie	Revue
Langue	Anglais Français
Date de mise en ligne	10/04/2025
Date de génération du PDF	07/02/2026
Recherche plein texte	Disponible
Notice complète	https://www.sudoc.fr/039014541
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-C.10

Note de présentation du

...

8. Rue. 107

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
LABORATOIRE D'ESSAIS



BULLETIN
DU
LABORATOIRE D'ESSAIS
1945 - N° 10

PUBLICATION N° 89

(Voir le sommaire au verso)

SOMMAIRE

G. BLET. — Recherches de photométrie hétérochrome (à suivre). page 97



BULLETIN DU LABORATOIRE D'ESSAIS

DU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS & MÉTIERS

RECHERCHES DE PHOTOMÉTRIE

HÉTÉROCHROME. - Sources monochromatiques ; Photométrie de papillotement ; Applications. (suite)

DEUXIÈME PARTIE

PHOTOMÈTRES ET PHOTOMÉTRIE

DE PAPILLOTEMENT

CHAPITRE IV

PHOTOMÈTRES PAPILLETOEURS

§ 1. — LE PROBLÈME DE LA PHOTOMETRIE HETEROCHROME.

Ce problème consiste dans la détermination relative des intensités lumineuses de deux sources de couleur différente. Envisagé dans son ensemble, il comporte de nombreuses difficultés qui peuvent se ramener à celles-ci :

A. — *Est-il possible de définir l'égalité de deux intensités lumineuses de couleur différente?*

B. — *Est-il possible de définir la somme de deux intensités lumineuses de couleur différente?*

Dans le cas de la photométrie homochrome, ces deux questions ont reçu depuis longtemps une réponse affirmative justifiée par l'emploi des divers types de photomètres à plages juxtaposées et la précision des résultats obtenus (0,5 %).

Lorsque les sources sont légèrement différentes, telles par exemple que lampes à carbures (liquides ou gazeux) d'une part, et lampes à incandescence d'autre part, ou même types divers de lampes à incandescence, la différence de couleur qui en résulte cause une gêne pour l'observateur, du fait qu'il lui est impossible de faire évanouir la ligne de séparation qui limite les deux plages du photomètre. Cette gêne entraîne une dispersion plus grande des pointés d'où une moindre précision (2 %).

Mais dès que les couleurs deviennent nettement différentes, les difficultés sont très sérieuses, un observateur même entraîné apprécie difficilement l'égalité d'intensité de deux plages différemment colorées. Voici à peu près comment les choses se passent : l'observateur fait une première égalisation qui lui semble correcte, mais une seconde égalisation peut lui donner le même sentiment d'exactitude tout en différant considérablement de la première (de 10 à 50 %). Sur une amplitude de dispersion aussi grande, l'observateur éparpille ses pointés sans pouvoir donner sa préférence aux uns ou aux autres.

Des recherches furent entreprises pour essayer de tourner cette difficulté. D'abord dans le principe du photomètre : au lieu de conserver deux plages juxtaposées, on multiplie celles-ci en les imbriquant les unes dans les autres (Héséhous [22], LUMMER). L'effet de relief produit par ces photomètres à contraste est ainsi augmenté et les possibilités de l'appareil légèrement accrues. La méthode elle-même fut modifiée. Au lieu de comparer directement les sources de couleur très différente, on peut faire des égalisations successives avec des sources de couleurs intermédiaires : c'est la méthode du *pas à pas*. La difficulté se trouve ainsi fractionnée, d'autant plus que le nombre

d'intermédiaires est plus grand, mais les erreurs élémentaires ont d'autant plus de chances de s'accumuler : il faut donc se limiter à une cote mal taillée. La précision obtenue est ainsi meilleure (5 %) mais au détriment de la durée des opérations.

Cherchant toujours une meilleure solution, on en vint à abandonner le principe même de la photométrie homochrome, comparaison de deux plages, pour d'autres critères totalement différents. Telles sont, par exemple, la mesure de l'acuité visuelle et celle de la fréquence critique.

a) MÉTHODE DE L'ACUITÉ VISUELLE

[8] [25c] [31b] [31c] [31d]

Deux éclairements de nature quelconque sont réputés égaux s'ils permettent de discerner les mêmes détails. Ce procédé est satisfaisant du point de vue théorique puisqu'il correspond à l'utilisation pratique de la lumière. Mais sa mise en œuvre est délicate quant au choix des « tests » et les résultats obtenus sont très dispersés, même pour un seul observateur.

b) MÉTHODE DE LA FRÉQUENCE CRITIQUE

Elle consiste à hacher périodiquement la lumière qui tombe sur la rétine. A partir d'une certaine fréquence dite fréquence critique, la sensation paraît continue. Cette fréquence croissant avec le niveau de la brillance, deux éclairements sont déclarés égaux s'il leur correspond une même fréquence critique. Là se présente encore une difficulté, quelle forme de courbe adopter pour la loi de variation de l'éclairement en fonction du temps? Des études systématiques ont été poursuivies, montrant des résultats discordants suivant la loi (sinusoïdale, en dents de scie, en créneaux, etc.).

Ces deux méthodes fournissant des résultats très dispersés permettent d'évaluer un ordre de grandeur mais non pas une mesure précise.

§ 2. — LA PHOTOMETRIE DE PAPILLOTEMENT.

La solution la plus féconde devait être proposée en juin 1893 par OGDEN N. Rood [41a] [41b] [41c], professeur au *Columbia College*. Sous le titre : « D'une méthode photométrique indépendante de la couleur », il détaillait un mode opératoire où les sensations colorées n'interviennent plus.

Si l'on fait se succéder sur la rétine à cadence convenable deux éclairements distincts en intensité, chaque substitution fera éprouver à l'œil un « choc » dont la répétition constitue le phénomène appelé « papillotement » (flicker). Si les éclairements sont de même couleur, il est

possible de les régler de telle sorte que le papillotement disparaît : le bon sens et la photométrie ordinaire sont d'accord pour déclarer égaux les deux éclairements rétiniens ainsi réglés. Le mérite de Rood est d'avoir découvert que, même pour des éclairements de couleur très distincte, il était possible par un réglage convenable de faire, là aussi, disparaître le papillotement. Ceci permettait évidemment de caractériser une lumière colorée par un nombre se rapportant à des unités choisies en lumière blanche. Pour que ce nombre puisse constituer une mesure et non seulement un repérage des intensités, il était nécessaire d'obtenir des recoupements avec la méthode de photométrie homochrome. C'est ce que Rood a réalisé en mesurant la luminosité d'un gris résultant du mélange de deux complémentaires, soit :

- 1° par comparaison directe avec un gris étalon;
- 2° par comparaison par papillotement de chaque composante avec le gris étalon.

Ces mesures, répétées pour les couples violet-vert, rouge-vert-bleu, jaune-bleu ont fourni des résultats concordants à quelques pour cent près. A cette approximation près, Rood pouvait définir l'égalité de deux éclairements de couleur distincte par la suppression du phénomène de papillotement.

Le dispositif initial était assez sommaire : un disque de carton portant deux demi-disques colorés séparés par un diamètre.

L'ensemble, éclairé par une lampe immobile, était mis en rotation et l'observation se faisait en fixant une petite région à mi-chemin entre le centre et le bord. Rood possédait une collection de 100 demi-disques dégradés du blanc au noir. Un disque de couleur est placé sur l'appareil et l'on cherche le demi-disque gris pour lequel le papillotement disparaît, ou ceux pour lesquels il est minimum : il est possible d'apprécier une fraction de l'écart qui les sépare. En remplaçant le disque coloré par un autre on peut trouver également le gris équivalent. La comparaison de ceux-ci peut se faire en photométrie homochrome. De cette manière, Rood arrivait à déceler des écarts de 1% entre les luminosités de deux cartons.

Ces travaux furent repris par WHITMAN [52] en 1896 et par le Dr. TUFTS [47] en 1897.

1° L'appareil (figure 23 a) construit par WHITMAN comportait essentiellement un disque diffusant échancré dont la rotation entraînait l'occultation périodique d'un second diffuseur fixe situé à l'arrière.

2° TUFTS a repris un dispositif analogue en éclairant le diffuseur fixe par la lumière issue d'un spectroscope, ce qui faisait de l'instrument un spectrophotomètre avec lequel il commença l'étude de la courbe de visibilité.

En 1899, OGDEN N. Rood publia un nouvel article sur un photomètre papilloteur réalisé par lui en 1897 et sur ses possibilités.

C'était vraiment le premier appareil (figure 23 b) permettant la comparaison de deux lumières diversement colorées, par la méthode de papillotement. Les deux sources éclairaient deux faces verticales d'un prisme triangulaire. La lumière diffusée par l'une ou l'autre de ces surfaces était alternativement renvoyée dans le champ d'un viseur au moyen d'une lentille cylindrique oscillante. Rood faisait déjà quelques remarques au sujet de la ligne de séparation (en l'occurrence l'arête du prisme), du champ qu'il jugeait préférable de choisir petit (valeur utilisée : 1°20'), de la vitesse optimale de papillotement (voisine de 16 pps, croissant avec la brillance du champ). Effectuant pour la même comparaison diverses séries de 10 pointés, les divergences entre les moyennes de ces séries étaient de l'ordre de 1 à 2 % comparables aux écarts observés en photométrie homochrome.

Voici, dans l'ordre chronologique, les types les plus caractéristiques des photomètres papilloteurs.

En 1904, SIMMANCE et ABADY [42] construisirent un appareil (figure 23 c) où la surface diffusante était celle d'un solide en plâtre de forme convenable : deux cônes de révolution identiques à base oblique, sont accolés par celle-ci : l'ensemble peut tourner autour d'un axe équidistant et parallèle à ceux des cônes. L'observation se fait

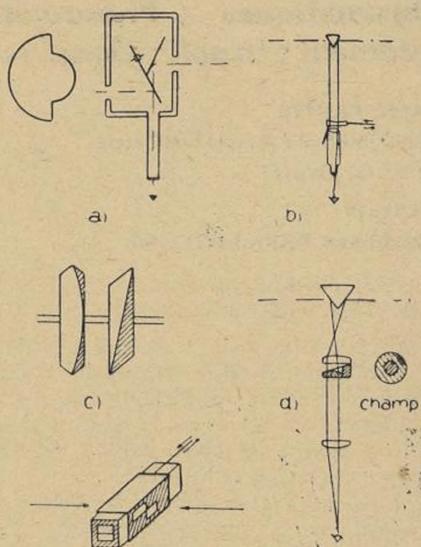


Fig. 23

sant perpendiculairement à l'axe, le solide, par suite de sa rotation, présente à l'œil successivement la surface de chaque cône, et réalise ainsi l'alternance cherchée.

En 1905, MARTENS [33], puis BECHSTEIN [4] réalisent la substitution au moyen d'un ensemble prisme-lentille (figure 23 d) tournant autour de l'axe de celle-ci. Ce dispositif envoie vers l'œil un faisceau provenant alternativement de chaque face d'un prisme diffusant en carton blanc (remplacé ultérieurement par un prisme en plâtre).

La même année, KRÜSS [29] employait un dispositif similaire à prisme tournant : mais son photomètre était à vision directe et comportait un cube de LUMMER dont les deux champs étaient rapidement intervertis.

En 1915, KINGSBURY [27a] présentait un adaptateur papilloteur pour photomètre universel. Un prisme tournant faisait alterner dans le champ chaque plage.

En 1930, PIATTI [34] mettait au point un photomètre (figure 23 e) permettant soit la comparaison directe, soit le papillotement. L'œil observe la lumière diffusée à l'intérieur d'un bloc de paraffine perpendiculairement à la direction de la lumière incidente. Les deux plages, situées l'une au-dessus de l'autre, reçoivent chacune la lumière provenant de l'une des sources à comparer. Un système de distribution à tiroir permet d'alterner rapidement chaque plage.

Plus récemment, en 1935, GUILD [21b] a réalisé un papilloteur revenant à la méthode initiale de substitution. Un secteur diffusant constituait l'une des plages masque et démasque successivement une seconde surface fixe diffusante formant l'autre plage.

De nombreuses recherches effectuées surtout depuis les travaux de Ives [25b] en 1912, ont mis en évidence les traits suivants de la photométrie par la méthode de papillotement, en ce qui concerne les résultats obtenus :

1° Ils diffèrent généralement de ceux fournis par la comparaison directe, dès que la différence de couleur devient grande;

2° Ils dépendent de nombreux facteurs caractérisant les conditions de la mesure;

3° Dans les conditions données, ils sont reproductibles avec une bonne précision.

Dans les divers laboratoires étrangers, principalement américains, où le papillotement a été sérieusement étudié, l'accord ne s'est pas encore réalisé de manière complète sur les conditions d'emploi et surtout sur l'accord de cette technique nouvelle avec la technique habituelle de photométrie par plages juxtaposées. Il semblait donc intéressant d'entreprendre une étude systématique du papillotement, de confronter les résultats acquis à la lumière de nouvelles recherches dans l'espoir d'arriver à une codification nette de cette méthode et de bien préciser les résultats que l'on peut en attendre.

§ 3. — ETUDE COMPARATIVE CRITIQUE DES DIVERS TYPES DE PHOTOMETRES PAPILLOTEURS ENUMERES CI-DESSUS.

Ces appareils peuvent se classer en plusieurs groupes : soit d'après leur principe général : à vision directe ou à écran diffusant — soit d'après leur réalisation : alternance par procédé mécanique ou optique. Chacune de ces caractéristiques a ses avantages et ses inconvénients qui vont être successivement détaillés.

A) VISION DIRECTE OU ÉCRAN DIFFUSANT?

Le premier principe a un gros avantage : celui de la luminosité puisque, aux pertes près (réflexions, absorptions), la brillance du champ est égale à celle de la source. Ceci autorise évidemment l'emploi de sources de faible brillance, par exemple fente de sortie d'un monochromateur double même peu ouvert. Par contre, ce dispositif présente un gros inconvénient : il s'agit de la disposition relative de la pupille de sortie de l'instrument et de la pupille de l'œil. Sauf le cas de sources diffusantes, celles que l'on emploie ont de petites dimensions de brillance uniforme, ce qui conduit à une pupille de sortie excessivement réduite. Or, si elle ne couvre pas celle de l'œil,

l'effet STILES-CRAWFORD (modification de la sensibilité de l'œil suivant le point de la pupille traversé par le rayon) intervient fâcheusement pour rendre les résultats dépendants dans une large mesure de la position de l'œil. L'utilisation d'un œilletton n'est pas toujours une garantie suffisante contre les déplacements éventuels de l'œil.

L'écran diffusant a contre lui sa faible brillance, ce qui oblige à utiliser corrélativement des sources d'intensité élevée pour avoir un éclairement suffisant à l'écran. Vu la remarque faite précédemment au sujet des dimensions des sources usuelles, cette intensité entraîne une grande brillance. Mais, chaque point de l'écran rayonnant dans toutes les directions, la pupille de l'œil est entièrement couverte, quelle que soit sa position et l'effet STILES-CRAWFORD n'intervient pas. Il faut mentionner aussi que, si l'écran diffusant se prête à toutes les solutions pour faire varier la brillance du champ, il n'en est pas de même pour les photomètres à vision directe qui ne peuvent jouer sur la distance de la source, la brillance de l'image étant toujours égale à celle de cette dernière.

B) ALTERNANCE MÉCANIQUE OU OPTIQUE?

Les diverses solutions préconisées utilisent :

soit le masquage périodique d'un écran fixe (ou d'un champ à vision directe) par un écran mobile, chacun d'eux ne recevant qu'une des lumières à comparer;

soit l'exploration alternative des deux écrans par le truchement d'un ensemble prisme-lentille.

Dans tous les cas, l'utilisation de deux écrans distincts prive l'appareil de symétrie et le rend irréversible, ce qui oblige à effectuer les mesures par méthode de double pesée (pratiquement d'ailleurs presque toujours employée). L'alternance optique a l'inconvénient de faire traverser par la lumière un nombre plus ou moins important de dioptrès, ce qui d'une part diminue la luminosité de l'appareil, et d'autre part modifie la composition spectrale de la lumière, les deux facteurs, absorption et réflexion, étant des phénomènes sélectifs.

L'appareil à préconiser aurait donc un seul écran diffusant et l'alternance serait réalisée mécaniquement.

CHAPITRE V RÉALISATION ET UTILISATION D'UN PHOTOMÈTRE PAPILLOTEUR CONDITIONS D'EMPLOI

§ 1. — RÉALISATION D'UN NOUVEAU PHOTOMÈTRE PAPILLOTEUR.

D'après ce qui précède, l'appareil idéal ne doit faire appel à aucun phénomène à caractère sélectif. Il doit assurer une substitution parfaite d'une plage à la suivante avec une ligne de passage idéalement fine. Pour plus de commodité, il sera réversible, c'est-à-dire que les deux circuits lumineux seront géométriquement et optiquement identiques.

C'est en s'inspirant de ces conditions de base que l'appareil représenté par la figure 24 a été conçu. Le point essentiel est d'amener dans l'œil, suivant la même direction, deux rayons issus de deux sources lumineuses distinctes. Il est donc nécessaire de dévier ces rayons lors de leur parcours de la source à l'œil. Cette déviation peut être réalisée : a) par réfraction, b) par réflexion, c) par diffusion.

a) La réfraction utilisée seule produisant une déviation dépendant de la longueur d'onde est évidemment à rejeter.

b) En admettant que les phénomènes de polarisation produits par réflexion ne gênent pas, le facteur de réflexion varie suffisamment d'une extrémité à l'autre du spectre pour introduire dans certains cas des erreurs supérieures

aux erreurs de mesure (pour un verre courant, la variation atteint 5 % pour une incidence voisine de 45°).

c) Le diffuseur parfait n'existe pas [37b], mais une

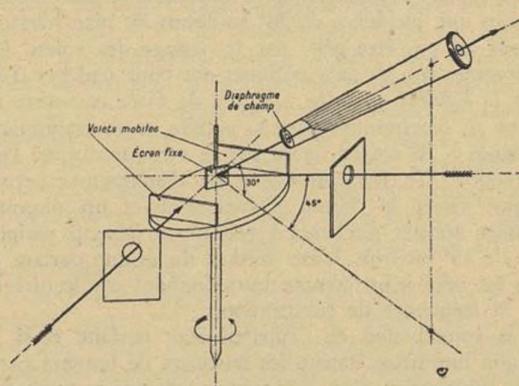


Fig. 24

couche de magnésie déposée dans des conditions bien déterminées a un facteur de réflexion diffuse variant de moins de 1 % sur l'étendue du spectre visible.

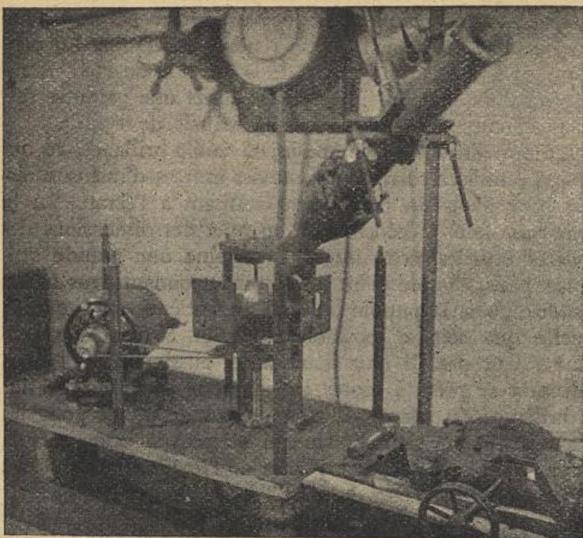


Fig. 24 bis

Les conditions de dépôt de la magnésie ont été étudiées par PRIEST et RILEY [37a]. Le support doit être en laiton ou de préférence en nickel parfaitement poli : le ruban de magnésium en combustion doit être placé en dessous de la surface à recouvrir à une distance de l'ordre de 5 cm. Pour une flamme placée plus près ou plus loin le facteur de réflexion diffuse est plus élevé dans le bleu ou dans le rouge. En conséquence, le support a été préparé comme suit : une plaque de laiton a été dressée mate sur le marbre, nickelée par électrolyse puis polie au marbre.

On utilisera de préférence un diffuseur en magnésie, et pour que le montage soit réversible, cet écran sera éclairé sous la même incidence par chaque source, et examiné dans le plan bissecteur de la direction des deux sources.

Le schéma de l'appareil étant ainsi déterminé, il ne reste plus qu'à trouver le procédé mécanique qui créera l'alternance des deux éclairements. Ce résultat est obtenu par l'emploi de deux volets v_1 et v_2 dont les quatre arêtes biseautées sont situées verticalement aux quatre sommets d'un carré dont le centre est placé sur l'axe d'un disque horizontal. Les deux sources S_1 et S_2 sont placées dans deux directions rectangulaires et l'écran de magnésie est disposé verticalement au point d'intersection des axes optiques : il est éclairé sous une incidence de 45° par chaque source. L'observation se fait dans le plan bissecteur sous une incidence de 30° au-dessus du plan horizontal pour ne pas être gêné par le passage des volets. Les diaphragmes sur les axes optiques ont pour seul but d'éliminer la lumière parasite. Le tube de visée comporte un œillet non diaphragmant pas la pupille, et un diaphragme de champ à 30 cm en avant sur le contour duquel l'œil accommode. Un jeu convenable de diaphragmes permet de faire varier le champ d'observation et un dispositif accessoire permet d'éclairer à volonté un champ périphérique de 10° environ. L'axe vertical du disque portant les volets est relié à un compte-tours donnant par lecture directe la fréquence de substitution.

Si la construction de l'appareil était parfaite et si les faisceaux lumineux étaient des faisceaux de lumière parallèle, la substitution d'un éclairage à l'autre se ferait sans omission ni addition, la ligne de séparation étant une ligne au sens géométrique.

MÉCANISME DU PAPILLOTEMENT

Le phénomène de papillotement peut se décomposer en deux effets distincts :

1^o *Effet de scintillation* proprement dit, dû à la succession sur la rétine d'éclairages d'intensités différentes;

2^o *Effet de teinte sensible* dû à la naissance dans les organes de la vision d'une sensation colorée subjective : celle-ci résulte d'une superposition partielle des lumières comparées, par suite de la persistance des impressions lumineuses.

Le premier effet intervenant quelles que soient les couleurs étudiées est seul en cause en cas de comparaison homochrome.

Le photomètre papilloteur donne en ce cas mêmes résultats que le photomètre à plages juxtaposées (LUMMER-BRODHUN) mais la sensibilité semble accrue.

Le deuxième effet se manifeste dès que les couleurs des deux sources diffèrent, mais il n'est appréciable que pour des comparaisons nettement hétérochromes. A l'égalisation, le papillotement disparaît et la couleur perçue est une résultante subjective : ainsi une comparaison rouge-vert donne une impression jaune. Pour une légère différence d'intensité des sources, la scintillation réapparaît en même temps que la couleur vire vers l'une ou l'autre des teintes à comparer. Cet effet de teinte sensible favorise considérablement l'égalisation photométrique, au point que la précision des pointés est nettement meilleure pour les comparaisons hétérochromes que pour les comparaisons homochromes en photométrie de papillotement.

PARTICULARITÉ DE L'APPAREIL

Contraste de papillotement dans le champ.

L'écran d'observation étant incliné à 45° sur chacun des faisceaux lumineux n'a pas un éclairage uniforme. Soient $2l$ la longueur de l'écran et d la distance de la source d'intensité lumineuse I , l'éclairage au centre de l'écran est :

$$E = \frac{I}{d^2}$$

Sur les bords il sera :

$$E' = \frac{I}{\left(d \pm \frac{l\sqrt{2}}{2}\right)^2}$$

soit :

$$E' = \frac{I}{d^2 \left(1 \pm \frac{l\sqrt{2}}{2d}\right)^2} = E \left(1 \pm \frac{l\sqrt{2}}{d}\right)$$

La variation relative d'éclairage est :

$$\frac{dE}{E} = \frac{E' - E}{E} = \pm \frac{l\sqrt{2}}{d}$$

Les deux sources ne sont pas forcément identiques donc à la même distance. Sur un bord du champ, la différence entre les éclairages produits par chaque source est :

$$E_1 - E_2 = E \left[\left(1 + \frac{l\sqrt{2}}{d_1}\right) - \left(1 - \frac{l\sqrt{2}}{d_2}\right) \right]$$

le bord de l'écran le plus près d'une source étant le plus loin de l'autre :

$$\Delta E = E \left[\left(\frac{l\sqrt{2}}{d_1} + \frac{l\sqrt{2}}{d_2}\right) \right]$$

La figure 25 reproduit les variations des éclairages E_1 et E_2 en fonction de la distance au centre ; l étant petit vis-à-vis de d , les courbes ont été remplacées par leur tangente.

L'expérience montre (et la figure permet de le comprendre aisément) que : lorsque l'équilibre est réalisé au milieu du champ, il ne l'est pas sur les bords et l'écart ΔE peut-être suffisant pour qu'il lui corresponde une scintillation perceptible. Dans ce cas, le centre du champ paraît correctement réglé alors que les bords « papillotent » encore.

Déplacer une source revient, sur le graphique, à faire monter ou descendre à peu près parallèlement à elle-même l'une des courbes, soit E_1 , qui vient en E'_1 : la scintillation augmente sur un bord (à gauche dans ce cas) pour diminuer sur l'autre, cependant que la zone nette se déplace (vers la droite). Il faut remarquer toutefois que

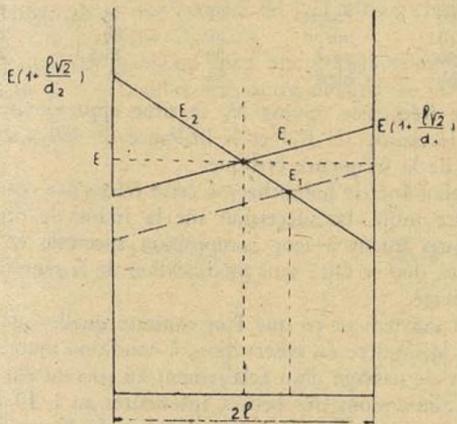


Fig. 25

cette zone n'est pas limitée au point où les éclairements sont égaux : il existe un seuil au-dessous duquel l'œil ne perçoit plus les différences d'éclairements. Il est commode de le déterminer, en éclairant un côté de l'appareil en lumière parallèle : $d_2 \rightarrow \infty$ et $\Delta E = E - \frac{l\sqrt{2}}{d}$; la distance d , à partir de laquelle il n'y a plus scintillation sur les bords du champ permet de définir ce seuil : pour un écran tel que $2l = 15$ mm, on a trouvé $d = 2$ mètres approximativement, soit

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{15\sqrt{2}}{2 \times 2000} = \frac{5}{1000}$$

Un écart d'éclairage de 5/100 semble donc être le minimum directement perceptible par photométrie de papillotement, ce qui n'exclut nullement la possibilité de réaliser des séries de pointés dont le centre de gravité soit défini avec une précision supérieure.

CONDITIONS D'EMPLOI DU PHOTOMÈTRE PAPILLETOEUR

Un certain nombre de facteurs ont une influence déterminante sur les mesures, ce sont :

- a) la fréquence de papillotement et la largeur de la ligne de séparation;
- b) la grandeur angulaire du champ;
- c) la brillance du champ;
- d) la brillance du champ périphérique.

Les mesures relatives aux facteurs a), b), c), n'ont été faites que par un seul observateur (G. BLEU). Il serait souhaitable de les reprendre pour d'autres observateurs afin d'obtenir des valeurs moyennes. On peut toutefois prévoir que les phénomènes constatés resteront semblables, les valeurs numériques absolues seules étant plus ou moins modifiées.

§ 2. — INFLUENCE DE LA FREQUENCE DE PAPILLETOEMENT ET DE LA LIGNE DE SEPARATION

La fréquence de substitution N est le nombre de périodes lumineuses distinctes se succédant pendant une seconde sur la rétine. La durée de chacune de ces périodes

est donc de $\frac{1}{N}$ seconde. N_0 est la fréquence de substitution

optimale qu'il convient de réaliser pour utiliser au mieux le papilloteur.

Si la substitution se fait entre une certaine lumière et l'obscurité, il existe une fréquence N_C dite fréquence critique au delà de laquelle le papillotement disparaît.

Une première série d'expériences a pour but de mettre en évidence l'influence de la fréquence de substitution sur les sensations lumineuses éprouvées par l'observateur, sur le résultat de la mesure et sur son incertitude. A cet effet une lumière « blanche » (lampe à incandescence) fixe est égalisée successivement à diverses lumières colorées dont on règle l'intensité par variation de distance. Chaque fois les mesures sont effectuées pour diverses valeurs de la fréquence. Toutes les mesures de ce paragraphe ont été faites avec une grandeur de champ de 1°,4 et un niveau de brillance de 800 μ sb. correspondant à un éclairage de 25 lux sur l'écran diffusant.

Les phénomènes observés sont les suivants (fig. 26) : pour une valeur faible $N = 2$ l'œil perçoit encore les deux couleurs qui se succèdent dans le champ. Vers $N = 5$ les sensations colorées deviennent moins distinctes et il est

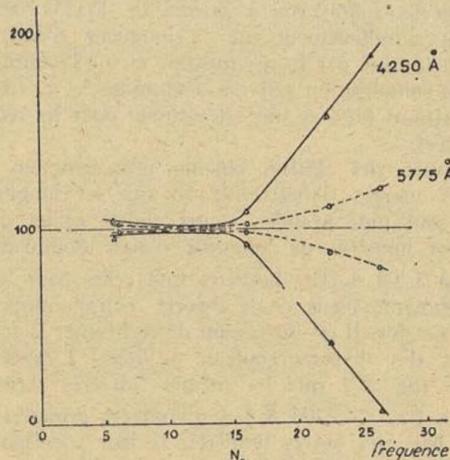


Fig. 26

possible d'apprécier un minimum du papillotement : la mesure est fatigante et la marge d'incertitude sur une série de 10 pointés atteint 3 à 4 % aux extrémités du spectre. Lorsque N croît, le minimum est de plus en plus marqué : il devient nul pour une fréquence N_0 nommée fréquence optima. Dans cette série de comparaisons, N_0 est voisin de 15 ($\pm 1/2$) et indépendant de la couleur de la lumière variable. La marge d'incertitude sur une série de 10 pointés se réduit à 0,2 % environ au milieu du spectre et 0,7 % aux extrémités. Lorsque la fréquence dépasse cette valeur optima N_0 , on constate que la disparition du papillotement persiste malgré des écarts croissants des brillances lumineuses comparées. Ces écarts se situent de part et d'autre de la valeur d'égalisation et leur amplitude caractérise un « palier ». Dans ce cas on peut faire la mesure en déterminant les deux limites, les « bords du palier ». Ces deux déterminations peuvent se faire avec une incertitude relative de 0,5 %.

L'expérience a montré que même pour des « paliers » s'étalant jusqu'à 95 % de part et d'autre de la valeur moyenne, celle-ci (moyenne arithmétique des valeurs correspondant aux bords des paliers) ne s'écarte au maximum que de 2 à 3 % de la valeur-type.

Cette valeur-type, nous la définissons comme résultat des mesures effectuées à la fréquence optima pour des raisons suivantes :

- 1° incertitude relative minima;

2° très faible variation de la moyenne pour des variations notables de N ;

3° confort des mesures.

Pour les grandes valeurs : $N = 30$ le papillotement disparaît quels que soient les écarts de brillance, ce qui correspond à la fréquence critique pour le niveau de brillance et la couleur utilisées.

Les lumières utilisées au cours de cette étude étaient de nature diverse. Quelques-unes étaient monochromatiques (radiations de l'arc au mercure isolées au moyen de filtres de SCHOTT) : elles sont désignées dans ce qui suit par leur longueur d'onde λ . La plupart (par suite du manque de monochromateur) étaient des lumières complexes obtenues en interposant un ou plusieurs filtres devant une lampe à incandescence : elles sont désignées par leur longueur d'onde dominante λ_d : celle-ci étant définie comme la longueur d'onde de la radiation donnant même sensation colorée. La détermination se fait de la manière suivante : un viseur permet d'observer un champ circulaire éclairé par la lumière complexe. Suivant le diamètre vertical de ce champ, se forme l'image de la fente d'entrée d'un spectroscope JOBIN-YVON à prisme de PELLIN-BROCA. En agissant simultanément sur la longueur d'onde de la lumière fournie par le spectroscope et sur l'intensité de la lumière complexe on arrive à déterminer le λ_d cherché à 10 angströms près, ce qui est suffisant pour les recherches envisagées.

L'examen des chiffres obtenus précédemment montre que les marges d'incertitude ou que les longueurs de palier sont plus grandes, toutes choses égales d'ailleurs pour les lumières de longueur d'onde dominante inférieure à 5.200 Å. Ces lumières sont celles pour lesquelles la composante bleue de la théorie trichromatique a une valeur notable. Il est intéressant de rechercher la fréquence critique des diverses couleurs utilisées. L'expérience a montré (fig. 27) que les mêmes lumières mentionnées ci-dessus ($\lambda_d < 5.200 \text{ \AA}$) se retrouvent groupées ensemble, à part des autres lumières. Il leur correspond une fréquence critique plus faible que pour les autres, ce qui est en rapport avec une valeur plus élevée de la durée de persistance des impressions lumineuses. Les variations de N_0 en fonction de la brillance du champ (d'ouverture 1°,4)

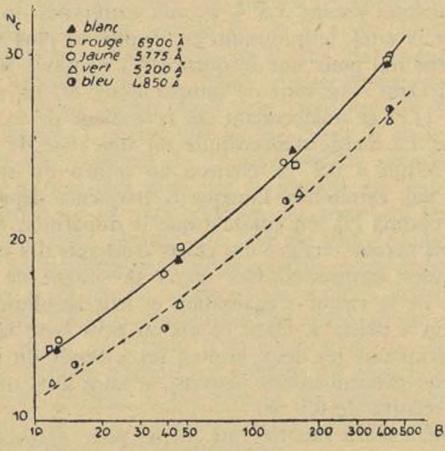


Fig. 27

semblent suivre deux courbes parallèles (avec en abscisse les logarithmes des brillances) pour chaque groupe de lumières.

Il y a évidemment une relation entre les fréquences critiques relatives à deux couleurs et la fréquence optima relative à leur égalisation. On conçoit que cette dernière

soit d'autant plus grande que le sont chacune des autres. Quelques mesures permettent de préciser cette relation.

Une égalisation « λ_d — blanc » permet de déterminer N_0 . En occultant successivement chacune des couleurs on peut mesurer N relative à chacune d'elles.

λ_d	couleur	N_c blanc	$N_c \lambda_d$	N_0 / λ_d blanc
6.900	rouge	30	30	15,2
5.775	jaune	30	30	17
5.200	vert	30	25,5	15
4.850	bleu	30	25	15,5

Cette fréquence optima N_0 se situe approximativement (pour le champ de 1°,4 et la brillance de 450 μ sb.) à la moitié de la fréquence critique.

En photométrie homochrome cette fréquence optima N_0 doit être nulle. La succession sur la rétine de deux flux identiques quant à leur composition spectrale et à leur intensité, doit se faire sans modification de la sensation lors du passage.

C'est exactement ce que l'on constate quelle que soit la λ_d de la lumière en observation, à condition toutefois que la ligne de passage d'un éclairement au suivant sur l'écran ait des dimensions très petites, inférieures au 1/10 de mm. Cet écran étant regardé à une distance de 40 cm, l'image rétinienne de cette ligne a alors une largeur :

$$Z = 0,1 \times 22/400 \text{ mm.}$$

(distance focale de l'œil 22 mm) soit 0,0055 mm, soit 5,5 μ .

Dans ce cas, le passage d'une bande de brillance différente sur la rétine ne produit pas de discontinuité dans la sensation, la largeur de la bande étant de l'ordre de grandeur des dimensions des unités sensorielles de la rétine.

Par contre, si la bande est plus large, son passage créera une discontinuité dans la sensation. Sa répétition périodique pourra nécessiter une fréquence de papillotement finie pour que la sensation soit continue.

L'expérience faite avec une zone de passage plus large (1 mm sur l'écran, 55 μ sur la rétine) donne les résultats suivants (champ 1°,4 brillance 150 μ sb. — comparaison homochrome).

$\lambda_d =$	.....	4.550	4.800	5.000	5.100	5.200
Z = 55 μ .....	.....	13	11	11	10	5
Z = 5,5 μ .....	.....	2,5	2	0	0	0
		5.400	5.600	5.850	5.900	6.000
		2	2	6,5	8	10,5
		0	0	0	1	13

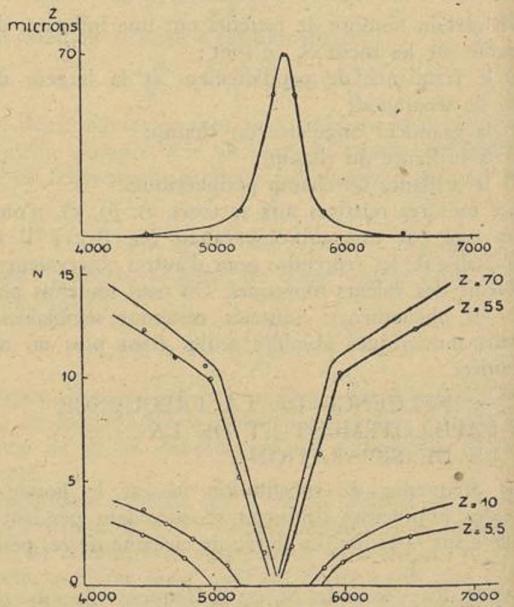


Fig. 28

Les courbes obtenues (fig. 28) présentent un minimum pratiquement nul pour $\lambda_d = 5.550$ correspondant au maximum de visibilité.

On peut aussi choisir la λ_d égale à 5.550 et faire croître la largeur de la bande de passage, pour une fréquence très faible ($N = 1$) jusqu'à apparition du papillotement. Ceci se produit pour une largeur de 1,25 mm correspondant à 70 μ sur la rétine (fig. 28).

Inversement on peut faire une comparaison entre une lumière de λ_d fixe et une autre dont la λ_d varie d'une

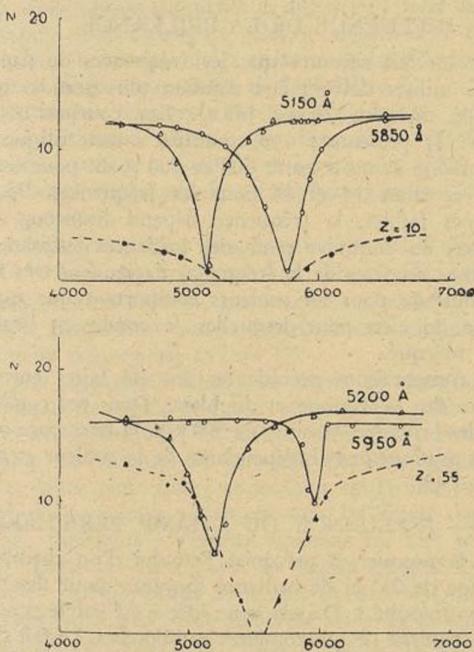


Fig. 29

extrémité à l'autre du spectre : on mesurera la fréquence nécessaire pour faire apparaître le papillotement, la largeur de bande étant déterminée. Les courbes de la figure 29 traduisent les résultats obtenus pour des largeurs de 10 μ et 55 μ et pour des lumières fixes de comparaison de λ voisines de 5.000 et 6.000 Å. La fréquence est pratiquement constante sauf dans la région où l'hétérochromie est peu marquée. Là la courbe présente un creux à pentes raides dont le fond se situe évidemment sur la courbe correspondant aux comparaisons homochromes pour une même largeur de bande.

Au lieu de raisonner sur la largeur de la bande on peut raisonner sur sa durée de passage. Le champ de 1°,4 correspond à 550 μ sur la rétine. La durée de chacun des

éclairements successifs est de $\frac{1}{2N}$ seconde. Le temps mis

par la bande pour balayer le champ est $\theta = \frac{1}{12,5} \times \frac{1}{2N}$

seconde d'après la construction de l'appareil.

Si Z est la largeur en μ de la bande sur la rétine, la durée d'impression des éléments sensoriels est en millièmes de seconde.

$$\tau = \theta Z / 550 \times 1000 = 0,07 Z / N$$

Soient deux cas opposés :

a) lumière très saturée : bande étroite $Z = 5 \mu$; fréquence $N_0 = 4$ on trouve : $\theta = \frac{1}{100}$ de seconde et

$\tau = 0,09$ millième de seconde.

b) lumière peu saturée : bande large $Z = 50 \mu$ fréquence $N_0 = 1$ on trouve : $\theta = \frac{1}{25}$ de seconde et

$\tau = 4$ millièmes de seconde. Le mécanisme est le suivant : impulsions de très courte durée (de l'ordre de 1/1000 de seconde) se succédant à une cadence de 2 à 10 par seconde.

Pour des fréquences plus élevées, donc pour des durées plus courtes, la sensation est continue.

La comparaison des courbes obtenues pour $Z = 5,5 \mu$ et $Z = 55 \mu$ semblerait prouver que les unités sensorielles excitées par des lumières peu saturées physiologiquement ont des dimensions plus grandes que celles excitées par des lumières plus saturées. On peut en déduire que l'acuité visuelle croît avec la saturation de la lumière.

Par ailleurs, le défaut d'achromatisme de l'œil peut expliquer le fait que des radiations complexes impressionnent une surface plus grande de la rétine d'autant plus que la lumière envisagée sera plus complète au point de vue des diverses couleurs du spectre, autrement dit qu'elle sera moins saturée : par contre une lumière très saturée, presque monochromatique donnera sur la rétine une image de dimensions plus réduites. Cette explication semble valable, qualitativement du moins, dans le bleu, mais à l'autre extrémité du spectre, les défauts d'achromatisme de l'œil sont très faibles et ne sauraient expliquer les écarts trouvés aussi élevés que dans le bleu.

Si on fait intervenir l'hypothèse antérieure, cela revient à admettre que les cônes, unités sensorielles de la fovea donnent à la sensation lumineuse le sens coloré par la perception des valeurs monochromatiques. Les associations de surface plus grande comprenant vraisemblablement des bâtonnets donneraient la mesure du facteur intensité, relatif à des perceptions peu saturées.

§ 3. — INFLUENCE DE LA GRANDEUR DU CHAMP DE MESURE.

Le dispositif utilisé pour avoir des champs de mesure de grandeur réglable comporte un jeu de diaphragmes que l'on peut disposer au foyer d'une lentille servant de viseur.

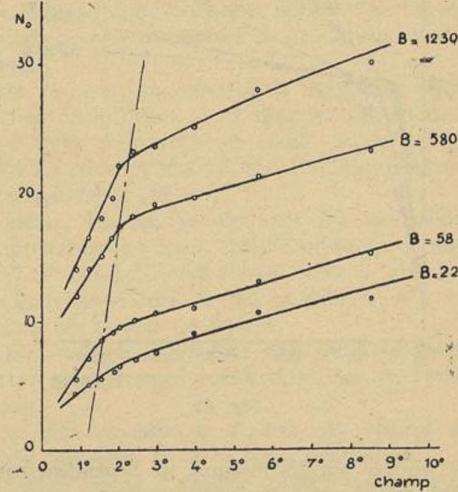


Fig. 30

L'œil est placé à l'autre foyer, ce qui permet d'obtenir une brillance uniforme du champ. Les variations du champ sont échelonnées de 1° à 10° pour quatre niveaux de brillance différents de 22 à 1230 μ sb. L'aspect présenté par la figure 30 met en évidence le caractère particulier des zones centrale (champ < 2°) et périphérique (champ > 2°).

Les mesures portaient sur une comparaison hétérochrome rouge ($\lambda_d = 6.500$)-blanc.

Pour chaque mesure on a déterminé simultanément la brillance relative des deux sources et l'amplitude des écarts moyens. Ceux-ci sont mesurés par rapport à la valeur trouvée pour le champ de 2° que l'on prend arbitrairement égale à 100. Il résulte de l'examen des courbes (figure 31) que les mesures sont plus cohérentes aux faibles brillances. Dans ce domaine, en effet, la valeur mesurée

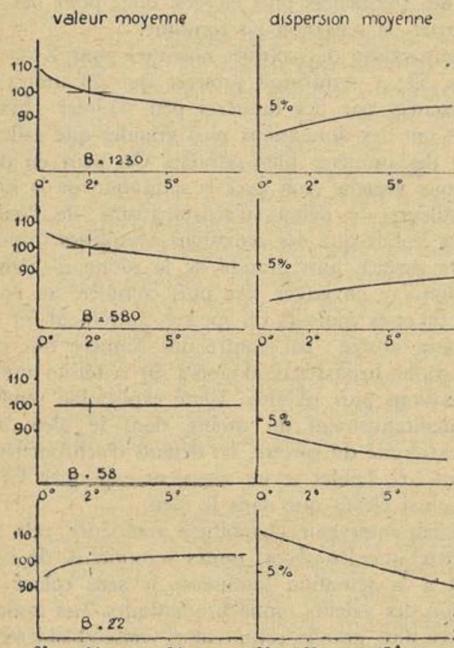


Fig. 31

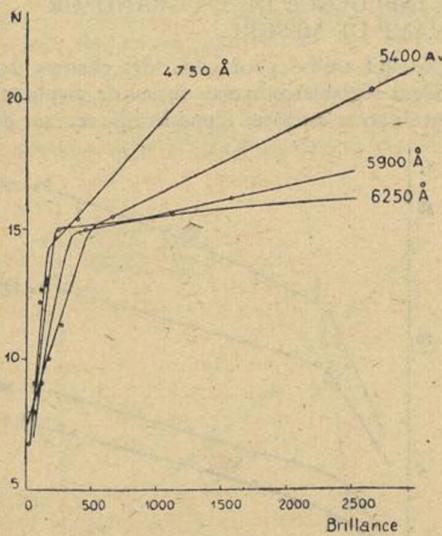


Fig. 32

et l'écart moyen sur les mesures, ne dépendent pas de la grandeur du champ. Pour les brillances plus élevées ($> 500 \mu\text{sb}$) on constate une décroissance de la brillance subjective du rouge par rapport au blanc lorsque le champ augmente.

Les résultats précédents peuvent s'interpréter en admettant que les cônes sont les récepteurs de la vision colorée : les sensations monochromatiques doivent paraître renforcées lorsque le champ contient surtout des cônes (fovea et

abords immédiats). Le contraire doit se produire lorsque les bâtonnets dominent (grands champs).

Pour les faibles brillances, la sensation colorée s'atténue pour disparaître complètement pour des brillances suffisamment faibles. Yves LE GRAND a montré que dans ces conditions les unités sensorielles de la rétine étaient des associations de cônes et de bâtonnets.

L'influence des cônes est très amoindrie sinon supprimée, et l'utilisation de champs réduits ne conduit plus à une surévaluation des brillances saturées par rapport aux brillances non saturées.

§ 4. — INFLUENCE DE LA BRILLANCE.

C'est un fait reconnu que les fréquences de papillotement à utiliser doivent être d'autant plus grandes que la brillance est plus élevée [46 a]. Les courbes obtenues (figure 32) présentent une courbure caractéristique dans un domaine compris entre 200 et 500 μsb . Pour les brillances faibles, la fréquence dépend beaucoup de la brillance, au contraire pour des brillances suffisantes les variations relatives de la fréquence deviennent très faibles sauf toutefois pour les couleurs comportant une quantité notable de bleu pour lesquelles le coude est beaucoup moins marqué.

Les comparaisons précédentes ont été faites entre une lumière de λ_d connue et du blanc. Dans ces conditions, pour des brillances voisines de 500 μsb , la fréquence optimale N_0 est pratiquement indépendante de la couleur et a pour valeur 15,5.

§ 5. — INFLUENCE DU CHAMP PERIPHERIQUE.

Ives, le premier, a préconisé l'emploi d'un champ périphérique de 25° et de brillance moyenne pour des raisons de « commodité ». Depuis, cette idée a été suivie et adoptée sur la majorité des photomètres papilloteurs. Le fait d'éclairer la région périfoveale de la rétine par une lumière différente de celle qui éclaire la fovea peut vraisemblablement apporter des perturbations de la vision centrale.

Deux sortes de contrastes peuvent se produire, soit un contraste de brillance, soit un contraste chromatique. A l'égalisation, les deux éclairements étant égaux en intensité, le contraste de brillance produit par le champ périphérique n'intervient pas (ce que l'on constate aisément en comparaison homochrome). Le niveau de brillance du champ périphérique est donc indifférent. Il est commode et agréable pour l'œil de le choisir égal ou tout au moins très voisin de celui du champ de mesure. Par contre, le contraste chromatique agit différemment sur chaque éclairement et peut par là modifier le résultat.

L'étude peut se faire systématiquement en choisissant le champ périphérique identique en composition et en brillance à l'une des plages. L'autre plage est de couleur variable à volonté. L'égalisation se fait successivement avec et sans le champ périphérique.

Le tableau VI montre que cette influence est loin d'être

TABLEAU VI

Couleur	Indigo	Bleu	Vert	jaune	Rouge
.....	4,800	4,940	5,150	5,550	5,850
Augmentation apparaente de brillance en %	2,5	3,4	1,2	1,2	0,0
Fréquence sans le champ périphérique	18	17	18	16,5	5
Fréquence avec le champ périphérique	24	23	23	21,5	13,5
Augmentation de la fréquence en % ..	33	35	28	30	50
					53

négligeable. Elle se manifeste tout d'abord par une augmentation nette de l'ordre de 40 % de la fréquence de papillotement. Mais surtout la valeur lumineuse attribuée à la seconde plage est modifiée et cela d'autant plus que la différence de couleur est plus marquée. La plage de couleur différente du champ périphérique semble exaltée et l'observateur éloigne la source correspondante pour rétablir l'équilibre. Il faut ajouter à cela une dispersion plus grande des pointés.

En résumé, dans le cas général, l'introduction d'un champ périphérique augmente la dispersion, donc diminue la précision, et modifiant les valeurs subjectives de chaque plage, altère le résultat de la mesure, et cela d'une façon dépendant de la composition de la lumière.

Les variations relatives constatées dépassent de peu l'incertitude de mesure obtenue par Ives. Mais les résultats plus précis atteints actuellement permettent d'être affirmatif quant à l'existence de ces modifications et d'en estimer la grandeur.

Une plage et le champ périphérique ont une brillance de 1.000 μ stilbs, produite par une lumière de longueur d'onde apparente 5850 Å. La longueur d'onde apparente de l'autre plage ainsi que la couleur sont indiquées dans la première colonne du tableau VI.

On peut également faire cette étude en demandant à l'observateur de régler le champ périphérique pour que sa couleur soit identique à la couleur subjective perçue dans le champ de mesure au moment de l'égalisation. Les mesures faites pour une comparaison rouge-vert par une dizaine d'observateurs montrent que les écarts constatés sont tous inférieurs à l'erreur moyenne sur une série de pointés. Dans ces conditions, le champ périphérique ne modifie en rien le résultat de la comparaison hétérochrome (la fréquence augmentant toutefois dans la même proportion que précédemment). Mais le réglage de ce champ dépend de l'observateur d'une façon considérable comme il est ais de s'en rendre compte d'après l'étude faite au chapitre X.

Il paraît donc préférable pour obtenir des résultats cohérents, sans exiger de chaque observateur un réglage différent pour chaque mesure, de s'abstenir de tout champ périphérique éclairé.

§ 6. — IMPORTANCE DU POINT DE FIXATION.

L'utilisation d'un champ restreint peut entraîner de grosses erreurs si l'image de ce champ ne se fait pas sur la « fovea ». En effet la sensibilité chromatique de la zone parafoveale ou périphérique diffère notablement de celle de la zone centrale, ainsi que le montrent les expériences suivantes.

Diverses égalisations ont été faites au photomètre papilloteur par plusieurs observateurs pour le bleu et le jaune. Les mesures se font successivement en vision centrale et périphérique. En ramenant à l'unité la valeur déterminée en vision foveale, les divers observateurs ont trouvé en vision périphérique les résultats consignés dans le tableau VII.

TABLEAU VII

	Bleu	Jaune
BÉGHIN	1,48	0,742
BOULANGER	1,88	0,728
CHESSÉ	1,69	0,708
STERLÉ	1,53	0,662
VULMIÈRE	3,83	0,935
BLET	3,18	0,858
GRUMBERG	1,88	
	2,11	0,772

La source de comparaison utilisée est verte. Les renseignements fournis par l'expérience sont donc valables relativement au vert. Les nombres trouvés varient sensiblement d'un observateur à l'autre surtout pour le bleu, mais le sens de l'écart n'en reste pas moins certain et la valeur moyenne de ces quelques mesures donne une idée assez exacte de l'ampleur du phénomène.

Lorsque l'on passe de la fovea à la périphérie, la sensibilité chromatique de la rétine double pour le bleu par rapport au vert, et diminue de 25 % pour le jaune par rapport au vert.

Ces valeurs considérables montrent l'attention toute particulière qu'il faut apporter pour que l'observateur fixe réellement la plage de papillotement, la vision devant être uniquement foveale.

En vision nocturne, la perception des impressions lumineuses se faisant principalement par la zone périphérique, les écarts constatés ci-dessus produisent un déplacement d'ensemble de la courbe de visibilité vers les courtes longueurs d'onde, traduction de l'effet PURKINJE.

§ 7. — CONCLUSIONS RELATIVES AUX CONDITIONS OPTIMA D'EMPLOI DU PHOTOMETRE PAPILLOTEUR.

L'étude systématique précédente des multiples facteurs qui interviennent dans une égalisation par photométrie de papillotement permet de choisir au mieux ces facteurs pour obtenir des résultats cohérents et reproductibles.

1° CHAMP. BRILLANCE.

Les résultats obtenus mettent en évidence le rôle de ces deux facteurs et l'existence de l'effet PURKINJE.

Une égalisation rouge-blanc donne des résultats dépendant de la brillance du champ. Mais pour une brillance moyenne de l'ordre de quelques centaines de μ stilbs, le résultat est pratiquement indépendant du champ. D'autre part, la dispersion des pointés semble croître avec la brillance dans le domaine étudié. Il paraît donc raisonnable de fixer la valeur optima entre 300 et 500 μ stilbs. Si la mesure ne dépend pas du champ pour une brillance moyenne, il n'en va pas de même pour les valeurs plus faibles ou plus grandes.

Aux brillances élevées, les champs réduits conduisent à une surestimation du rouge par rapport aux grands champs, alors qu'aux brillances faibles c'est l'inverse qui se produit, ce qui correspond à une inversion de l'effet PURKINJE.

Toutes les courbes donnant la fréquence optima en fonction de la brillance, pour diverses valeurs de la longueur d'onde, présentent un coude caractéristique vers 400 μ stilbs correspondant à une fréquence optima de 15, indépendante de la couleur.

De même, les courbes donnant N_0 en fonction du champ présentent un coude caractéristique pour un champ voisin de 2° aux brillances élevées et de 1° aux brillances faibles. Pour les valeurs de 400 μ stilbs et $N_0 = 15$, il correspond un champ de 1°,4.

Ces trois valeurs définissent une sorte de point triple délimitant simultanément deux domaines de brillance et de champ.

En ce qui concerne ce dernier, on obtient ainsi la dimension angulaire de la « fovea centralis ».

Il y a donc intérêt à adopter comme valeurs optima des conditions de travail, les valeurs déterminées par ces divers recouplements.

Elles diffèrent notablement des valeurs préconisées par Ives, en 1913, et adoptées depuis par la C.I.E. : champ 2° brillance 800 μ stilbs. Le champ plus faible correspond à une réduction plus complète de l'effet PURKINJE par élimination de la vision par les bâtonnets et simultanément à une diminution de la dispersion des pointés. Toutefois, les

dimensions de la fovea dépendant de l'observateur, l'adoption de la brillance plus réduite de $400 \mu \text{ sb}$. permet en s'en tenant à un champ fixe de $1^{\circ}4$ de ne pas le régler pour chaque observateur, les résultats de mesure étant indépendants du champ à ce niveau de brillance.

§ 8. — ALIMENTATION DES SOURCES LUMINEUSES.

Si l'alimentation est faite en courant continu, les mesures sont aisées. Si l'alimentation est faite en courant alternatif, plusieurs cas sont à considérer.

a) Lampes de même type et en phase (soit deux lampes à décharge, soit deux lampes à incandescence). Les mesures se font comme en courant continu sans difficultés nouvelles.

b) Lampes de types différents, par exemple une lampe à décharge et une lampe à incandescence. Le régime lumineux de ces lampes en alternatif est très différent : extinction presque totale de la lampe à décharge entre chaque alternance, oscillations de faible amplitude pour la lampe à incandescence. Le papillotement va donc produire un effet stroboscopique. Pour deux lampes de même type leurs intensités lumineuses sont les mêmes à chaque instant. Pour deux lampes de types différents seules leurs intensités moyennes sont égales. Pour supprimer cet effet stroboscopique qui ôte tout sens aux mesures, il est indispensable d'utiliser une fréquence de papillotement telle que la durée d'éclairage par chaque source contienne un nombre entier de demi-périodes du courant alternatif : la mesure portera ainsi sur les éclairages moyens. Cela revient à dire que la période de papillotement est multiple exact de la période du courant. Pour un réseau à 50 périodes, les fréquences possibles de papillotement sont donc :

$$25 - 16,66 - 12,50 - 10\dots$$

L'étude des conditions de travail montre que cette gamme est suffisante dans l'immense majorité des cas.

Remarque I : Il n'est pas du tout nécessaire qu'il y ait synchronisme entre le papillotement et l'alimentation, pourvu que la vitesse soit constante.

Remarque II : Les mêmes considérations et les mêmes résultats sont à retenir dans le cas de comparaison d'une source continue avec une source alternative.

Il est donc possible de comparer avec le photomètre papilloteur les intensités lumineuses de lampes de régimes lumineux très différents.

§ 9. — METHODES DE GRADATION DES ECLAIREMENTS PRODUITS SUR L'ECRAN PAR LA LAMPE-TARE.

Diverses techniques ont été proposées et utilisées pour agir sur la valeur du flux lumineux transporté par un faisceau défini géométriquement.

Les plus employées font appel aux propriétés suivantes :

a) *Nicols* : Le flux lumineux qui sort d'un système de deux nicols dont les plans de section principale font un angle α est avec le flux incident dans un rapport :

$$\tau_1 = 1/2 \cos^2 \alpha$$

b) *Coups absorbants* : constitués par une lampe transparente prismatique de transmission k doublée par un contre-coin d'absorption négligeable. Un flux lumineux qui traverse une épaisseur x de la lame absorbante est réduit dans un rapport :

$$\tau_2 = e^{-kx} \quad \text{ou} \quad \tau_2 = 10^{-D} \quad \text{en posant} \quad D = \frac{kx}{\log 10}$$

(D = densité optique).

c) *Disque de Talbot* : un disque portant une échancrure d'angle α et tournant à une vitesse quelconque mais

assez grande, réduit un flux lumineux dans un rapport :

$$\tau_3 = \frac{\alpha}{2\pi}$$

d) *Loi de l'inverse carré des distances* : l'éclairage produit sur un écran fixe par une source de brillance constante à des distances successives d_0 et d est réduit dans le rapport :

$$\tau_4 = \left(\frac{d_0}{d} \right)^2$$

Les quatre courbes reproduites sur la figure 33 montrent pour chacun de ces dispositifs l'affaiblissement obtenu en fonction de la grandeur mesurée directement; soit :

a) l'angle α des nicols;

b) la densité D du coin proportionnelle à son déplacement;

c) l'angle d'ouverture α du disque;

d) le déplacement réduit — de la source.

L'examen de ces courbes montre que la dernière donne la pente la plus faible dans la majorité de son étendue.

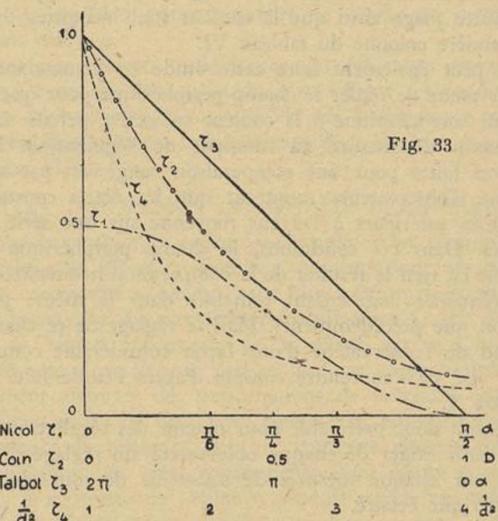


Fig. 33

Chaque méthode présente ses inconvénients que nous allons passer en revue successivement.

a) Les nicols provoquent des pertes de lumière par réflexion sur les diverses faces (entrée et sortie) et par absorption, phénomènes dépendant de la longueur d'onde modifiant donc la constitution des faisceaux lumineux.

En outre, l'état de polarisation initiale du faisceau lumineux incident fausse les résultats, si c'est le premier nicol qui tourne; si c'est le second, des erreurs peuvent intervenir si le faisceau transmis subit de nouvelles réflexions ou réfractions.

b) Les coins absorbants sont tous nettement sélectifs.

c) Le disque de TALBOT semble parfait à tous les égards; il faut signaler cependant la difficulté de mesurer avec précision l'angle d'ouverture lorsqu'on veut pouvoir le régler pendant chaque mesure. D'autre part, pour l'étude de flux lumineux variables périodiquement, les phénomènes stroboscopiques produits peuvent être gênants.

d) La loi de l'inverse carré des distances est une loi purement géométrique reposant sur la propagation rectiligne de la lumière. Elle semble donc parfaite. Son emploi exige toutefois certaines précautions sur lesquelles nous allons insister.

Cette loi n'est rigoureuse que si la source est ponctuelle, ce qui n'est jamais le cas. Voyons quel est l'ordre de gran-

deur des écarts lorsque la source a des dimensions, soit transversales, soit longitudinales.

Soit une source linéaire de longueur $2a$ dirigée perpendiculairement à la direction de l'écran situé à une distance d . L'éclairement produit sur l'écran par un élément dx de la source a pour valeur :

$$dE = \frac{B dx}{\hat{c}^2} \cos \alpha$$

si la brillance de la source est constante, il faut intégrer l'expression :

$$E = 2B \int_0^a \frac{\cos \alpha dx}{\hat{c}^2}$$

avec :

$$x = d \tan \alpha \quad dx = d \frac{d \alpha}{\cos^2 \alpha}$$

et :

$$\hat{c} = \frac{d}{\cos \alpha}$$

d'où :

$$E = \frac{2B}{d} \int_0^a \cos \alpha dx$$

et :

$$E = \frac{2B}{d} \sin \alpha$$

et

$$\sin \alpha = \frac{a}{\sqrt{d^2 + a^2}} = \frac{a}{d} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{a^2}{d^2}}}$$

$$E = \frac{2aB}{d^2} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{a^2}{d^2}}}$$

$$= \frac{2aB}{d^2} \left[1 - \frac{a^2}{2d^2} + \dots \right]$$

$$E = \frac{J}{d^2} \left(1 - \frac{a^2}{2d^2} \right)$$

Si l'on veut que l'écart soit inférieur à $1/2000$, il faut que :

$$a^2/2 d^2 \leqslant 1/2000$$

soit :

$$a/d \leqslant 1/31,6$$

La source utilisée ayant une longueur de $2a = 22 \text{ mm}$, nous devrons l'employer à des distances supérieures à :

$$d = 31,6 \times 1,1 = 35 \text{ cm.}$$

Soit maintenant la même source orientée dans la direction de l'écran situé à une distance d ; supposons que chaque élément de source n'absorbe absolument pas la lumière provenant des autres éléments. L'éclairement dE produit par un élément dx de la source a pour valeur :

$$dE = \frac{B dx}{(d-x)^2}$$

si la brillance de la source est constante, il reste à intégrer l'expression :

$$E = B \int_{-a}^{+a} \frac{dx}{(d-x)^2}$$

ce qui donne :

$$E = B \left[\frac{1}{d-x} \right]_{-a}^a$$

$$E = B \left[\frac{1}{d-a} - \frac{1}{d+a} \right]$$

$$E = B \frac{2a}{d^2 - a^2} = \frac{2aB}{d^2} \times \frac{1}{1 - \frac{a^2}{d^2}}$$

$$E = \frac{J}{d^2} \left(1 + \frac{a^2}{d^2} \right)$$

Ici encore, si l'on veut limiter l'écart à $1/2000$

$$a^2/d^2 \leqslant 1/2000$$

soit :

$$a/d \leqslant 1/44,7$$

La source utilisée ayant une profondeur utile $2a$ de 4 mm , nous devrons l'employer à des distances supérieures à :

$$d = 0,2 \times 44,7 = 8,9 \text{ cm.}$$

En fait, dans les conditions de travail $d > 50 \text{ cm}$ le calcul montre rapidement que l'erreur commise au total est inférieure à $1/4000$.

Par ailleurs, cette méthode permet une grande précision de repérage : la position du chariot peut aisément être repérée à $0,5 \text{ mm}$ près, ce qui crée une erreur de mesure égale au maximum à :

$$\begin{array}{r} 2 \\ \hline 1000 \\ 1000 \\ 0,5 \\ \hline 1000 \end{array} \begin{array}{l} \text{à } 50 \text{ cm} \\ \\ \\ \\ \text{à } 200 \text{ cm} \end{array}$$

Cette technique a été définitivement choisie en remarquant encore la nécessité absolue qu'aucun diaphragme ne vienne limiter l'ouverture des faisceaux entre la source et l'écran. Les conditions d'emploi étant bien déterminées, nous disposons là d'un moyen très pratique pour modifier un éclairement de composition spectrale quelconque, dans un rapport connu avec une incertitude relative inférieure au millième.

Remarque I : Si une distance supérieure à 50 cm est suffisante pour réduire les erreurs de dimensions de la source à des valeurs négligeables, il n'est pas indifférent de situer la lampe de comparaison n'importe où sur le banc photométrique. Des expériences relatées précédemment ont montré qu'un écart de $0,5 \%$ sur la brillance était directement décelable au papilloteur : le tableau ci-dessous indique en millimètres l'écart correspondant sur les pointés à diverses distances :

Distance	50 cm	100 cm	150 cm	200 cm
Ecart	1,25 mm	2,5 mm	3,75 mm	5 mm

Or, il est illusoire de chercher à faire des lectures à mieux de $0,5 \text{ mm}$ à cause de la graduation de la règle et de l'épaisseur de l'index, d'autre part, la position du zéro de l'échelle par rapport à l'écran diffusant se définit difficilement à mieux que $0,5 \text{ mm}$. Il ne faut donc pas descendre au-dessous de $d = 50 \text{ cm}$ pour garder aux mesures leur signification individuelle à quelques pour mille près. Pour les comparaisons à faible brillance en général, le seuil de perception du papillotement dépasse notablement $0,5 \%$ et peut atteindre 2% . Dans ce cas l'incertitude pour un même point atteint 2 cm à 2 mètres, les déplacements à donner à la lampe, en recherchant l'égalisation, commencent à prendre une importance qui nuit à la précision. Il est donc recommandable de se limiter aux abords de 2 mètres.

En se fixant ces limites, on s'impose de ne pouvoir comparer directement que des sources lumineuses dont le

rapport des intensités est inférieur à $(\frac{200}{50})^2 = 16$. Pour

des rapports plus grands, il est nécessaire d'utiliser une source d'intensité intermédiaire.

Remarque II : On peut avoir à régler des intensités lumineuses, mais sans que le mode de réglage nécessite une mesure ou même un repérage.

Pour de grandes variations, la méthode qui consiste à agir sur un diaphragme à iris placé dans le plan d'une image réelle de la source, est très pratique. On peut, en effet, dans le cas d'une source linéaire, obtenir des varia-

tions considérables sans modifier sensiblement la forme géométrique des faisceaux. Ceci est utile pour conserver dans le plan de l'écran un champ de pleine lumière à éclairement uniforme de dimensions à peu près invariables.

Pour de légères variations, finition d'un réglage par exemple, un appareil préconisé par IVES [25a] est d'emploi

confortable et également non sélectif. Il est constitué par un réseau de fils métalliques noircis tendus parallèlement sur un cadre. En modifiant l'inclinaison du plan du cadre par rapport à l'axe du faisceau lumineux, on agit sur la transmission du dispositif.

(A suivre.)

G. BLET.



ar
nt
re
la

