

## 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](http://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 n° 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](#))
- 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 passible 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	<a href="https://www.sudoc.abes.fr/cbs//DB=2.1/SET=17/TTL=3/REL?PPN=261820893&amp;RELTYPE=NT">https://www.sudoc.abes.fr/cbs//DB=2.1/SET=17/TTL=3/REL?PPN=261820893&amp;RELTYPE=NT</a>
Permalien	<a href="https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B_P1329-C">https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B_P1329-C</a>
LISTE DES VOLUMES	
	<a href="#">N°25 (1936)</a>
	<a href="#">N°26 (1937)</a>
	<a href="#">N°27 (1937)</a>
	<a href="#">N°28 (1937)</a>
	<a href="#">N°29 (1938)</a>
	<a href="#">N°30 (1939)</a>
	<a href="#">N°31 (1936)</a>
	<a href="#">N°32 (1938)</a>
	<a href="#">N°33 (1938)</a>
	<a href="#">N°34 (1938)</a>
	<a href="#">N°35 (1938)</a>
	<a href="#">N°36 (1938)</a>
	<a href="#">N°37 (1938)</a>
	<a href="#">N°38 ( 1938)</a>
	<a href="#">N°39 (1938)</a>
	<a href="#">N°40 (1939)</a>
	<a href="#">N°41 (1939)</a>
	<a href="#">N°42 (1939)</a>
	<a href="#">N°43 (1939)</a>
	<a href="#">N°44 (1939)</a>
	<a href="#">N°45 (1938)</a>
	<a href="#">N°46 (1940)</a>
	<a href="#">N°47 (1940)</a>
	<a href="#">N°48 (1940)</a>
	<a href="#">N°49 (1940)</a>
	<a href="#">N°50 (1940)</a>
	<a href="#">N°51 (1941)</a>
	<a href="#">N°52 (1941)</a>
	<a href="#">N°53 (1941)</a>
	<a href="#">N°54 (1941)</a>
	<a href="#">N°55 (1942)</a>
	<a href="#">N°56 (1942)</a>
	<a href="#">N°57 (1942)</a>
	<a href="#">N°59 (1942)</a>

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

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

<b>NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ</b>	
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	<a href="#">N°90 (1945)</a>
Adresse	Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 1945
Collation	1 vol. (p. [109-123]) : ill. ; 27 cm
Nombre de vues	20
Cote	CNAM-BIB P 1329-C (11)
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	<a href="https://www.sudoc.fr/039014541">https://www.sudoc.fr/039014541</a>
Permalien	<a href="https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-C.11">https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-C.11</a>



...

8° Km. 107

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
LABORATOIRE D'ESSAIS



BULLETIN

DU

LABORATOIRE D'ESSAIS

1945 - N° 11

---

PUBLICATION N° 90

(Voir le sommaire au verso)

---



## SOMMAIRE

---

G. BLET. — Recherches de photométrie hétérochrome (suite et fin) page 109





### RECHERCHES DE PHOTOMÉTRIE HÉTÉROCHROME. - Sources mono- chromatiques ; Photométrie de papil- lotement ; Applications. (suite et fin)

#### CHAPITRE VI

#### PRÉCISION OBTENUE AVEC LE PHOTOMÈTRE PAPILLOTEUR

##### § 1. — DISPERSION DES POINTES.

Une série d'un grand nombre de pointés relatifs à une même mesure permet de voir d'une part s'il existe des écarts accidentels et d'autre part la grandeur de l'écart à attribuer à la moyenne de la série.

C'est dans ce but qu'une série de mille pointés a été réalisée par un même observateur (G. BLET) dans des conditions normales d'emploi :

comparaison jaune-vert de brillance moyenne 400  $\mu$ stb, champ réduit 1°26', fréquence de papillotement optima, distance de la lampe mobile 1,50 m environ.

Les pointés étaient faits par séries rapides de 50 en 10 minutes environ avec intervalles de repos à peu près égaux : l'ensemble terminé dans la même journée.

Tous les écarts sont convertis en pour cent de la valeur moyenne qui se trouve ainsi ramenée à l'unité. Cette conversion est faite en intensité lumineuse (valeur cherchée) et non en distance, ce qui introduit une relation non linéaire ( $I = k/d^2$ ) entre grandeur et écarts mesurés.

##### EXEMPLE DE CALCUL.

Soit 153,645 cm une moyenne et 154,55 cm une mesure : l'écart mesuré est : 154,55 cm - 153,645 cm = 0,905 cm.

On peut calculer l'écart relatif par la formule approchée :

$$\frac{\delta I}{I} = 2 \frac{\delta d}{d} = 2 \frac{0,905}{153,645} = 0,0118 \text{ soit } 1,18 \%$$

alors que la valeur correcte de l'écart serait :

$$\frac{I_m - I}{I_m} = \frac{\left(\frac{K}{153,645}\right)^2 - \left(\frac{K}{154,55}\right)^2}{\left(\frac{K}{153,645}\right)^2} = 1 - \left(\frac{153,645}{154,55}\right)^2 = 1,170\%$$

Le même calcul repris avec la même moyenne et 152,74 cm pour mesure donne le même écart 0,905 cm, donc le même écart relatif approché 1,18 %, mais la valeur correcte de l'écart vrai est 1,175 %.

Ceci montre que le calcul approché augmente les écarts relatifs (augmentation négligeable pour le résultat final), la faute systématique ainsi introduite (de l'ordre de 1 %) étant plus grande pour les écarts en distance positifs, que pour les écarts en distance négatifs. La courbe de répartition obtenue doit donc se trouver dilatée et plus du côté positif que de l'autre.

En classant les écarts relatifs en pour cent par tranches, de -3,5 à -2,5 ; de -2,5 à -1,5..., etc., jusqu'à +2,5 à +3,5, les mille valeurs obtenues (calcul approché) se répartissent comme suit :

-3,5	-2,5	-1,5	0,5	+0,5	+1,5	+2,5	+3,5
10	70	235	365	240	73	7	
	315			320			

Cette distribution met en évidence un excès des écarts positifs conforme au raisonnement précédent. En effet, si les écarts positifs vrais sont inférieurs de 1 % environ aux écarts approchés dénombrés ci-dessus, environ 1 % d'entre eux seraient ramenés dans la colonne centrale, ce qui conduit à admettre approximativement pour distribution réelle des écarts (avec calcul analogue pour les écarts négatifs : correction de 0,5 %).

10 — 70 — 234 — 369 — 238 — 72 — 7

ou en ramenant au maximum 1000 :

27 — 190 — 635 — 1000 — 645 — 195 — 19

Ces points se situent remarquablement bien (fig. 34) sur une courbe de GAUSS tracée suivant l'équation

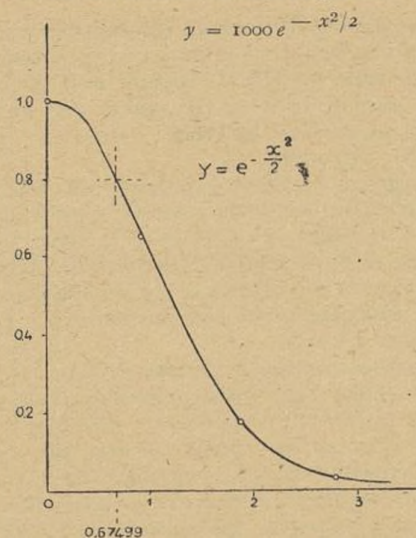


Fig. 34

où  $x$  prend la valeur 0,92 pour un écart de 1 %. Dans cette représentation l'écart-type a pour valeur  $x = 1$  soit ici en pour cent :  $x = 1,1$ , ce qui conduit à admettre comme écart probable sur la moyenne la valeur :

$$\frac{2}{3} \frac{\eta}{\sqrt{n}} = \frac{2}{3} \frac{1,1}{\sqrt{1000}} = 0,023 \%$$

Pour montrer la signification de ces résultats, il peut être utile de reprendre les mêmes opérations sur divers groupes de 10 pointés consécutifs.

Le tableau VIII, sans reproduire tous les calculs intermédiaires, donne les résultats pour deux séries qualifiées respectivement de mauvaise et de bonne.



TABLEAU VIII

Séries	Mauvaise	Bonne
	154,45 cm	153,50 cm
	4,50	3,15
	4,55	3,45
	3,95	3,95
	4,25	3,55
	3,45	3,40
	3,60	3,45
	1,50	4,25
	2,60	3,95
	3,60	3,70
Moyenne .....	153,645 cm	153,635 cm
Dispersion .....	3,05 cm	1,10 cm
Ecart type .....	1,47 %	0,1 %
Ecart probable .....	0,3 %	0,02 %

Sans attacher une valeur excessive à ces nombres qui portent sur des séries de 10 pointés seulement, on peut toutefois en conclure que : pour une dispersion de l'ordre du centimètre à 1,50 m, on a 95 chances sur 100 pour que la valeur vraie diffère de la valeur mesurée de moins de 2 pour mille.

## § 2. — MESURE DU FACTEUR DE TRANSMISSION MONOCHROMATIQUE D'UN FILTRE POUR UNE RADIATION DETERMINEE.

Une telle détermination comporte la mesure d'un certain flux lumineux monochromatique, puis la mesure du même flux affaibli par passage à travers le filtre considéré. La comparaison porte sur des lumières identiques : elle peut être réalisée uniquement par photométrie hétérochrome.

Il est donc possible d'utiliser un récepteur physique dont la sélectivité n'entrera dès lors pas en ligne de compte.

Par photométrie visuelle, la mesure peut être homochrome ou hétérochrome si l'on utilise une source de comparaison de couleur différente.

### a) MÉTHODE PHYSIQUE :

Le récepteur employé peut être simplement fidèle (photopile) et l'opération consistera à réaliser l'égalité des deux éclairagements successifs de la cellule en agissant sur l'un d'eux par une méthode appropriée de réduction. La mesure pourrait également être directe si l'on dispose d'un récepteur à caractéristique linéaire, une thermopile par exemple.

### b) MÉTHODE VISUELLE :

Le photomètre papilloteur permet de faire la comparaison avec emploi d'une source intermédiaire de couleur différente, ce qui semble compliquer le problème à plaisir.

Le rapprochement des résultats obtenus par ces deux méthodes permettra de porter un jugement « chiffré » sur la valeur des mesures effectuées au photomètre papilloteur. Il est à remarquer dès l'abord que l'introduction de comparaisons hétérochromes ne rend pas dans ce cas particulier le résultat fonction de l'observateur et qu'il sera donc possible d'en utiliser plusieurs.

### A. — Mesure par photométrie physique.

L'écran étudié est l'association de verres « ZEISS B » prévue pour isoler la raie verte (5461 Å) dans le spectre de l'arc au mercure. En fait il laisse passer de plus une fraction appréciable de la partie rouge du fond continu.

La source lumineuse est une lampe à arc au mercure PHILIPS type HP 300 dont on isole la radiation verte au moyen d'une combinaison de verres SCHOTT très sélective.

Faute de l'appareillage nécessaire à l'utilisation d'une thermopile, les mesures ont été faites au moyen d'une photopile (cellule au sélénium type L.M.T. 3002) par la méthode de zéro. Celle-ci consiste à mesurer la f.e.m. aux bornes de la photopile avec un potentiomètre, et à la maintenir constante au cours des mesures en déplaçant la source lumineuse par exemple.

Le récepteur étant placé loin de la lampe (environ 2 mètres) l'inclinaison des rayons marginaux est faible (le diamètre utile de la surface sensible est 8 cm donc  $\alpha = 2/100$  radian) et varie peu lorsqu'on déplace la lampe de la quantité nécessaire (25 cm environ  $\alpha = 2,3/100$  radian). Aucun diaphragme n'est interposé pour que la surface utile de la photopile soit toujours entièrement couverte.

Dans ces conditions, on peut appliquer la loi du carré des distances (il faut faire la correction due à l'épaisseur du filtre). Le fait que le faisceau n'est pas constitué par des rayons parallèles entre eux et normaux à l'écran, introduit une erreur dont la valeur relative est inférieure à  $10^{-4}$  donc négligeable.

Quatre mesures effectuées dans ces conditions ont donné pour valeur moyenne du facteur de transmission en lumière parallèle ( $\tau_0$ ) de cet écran la valeur :

$$\tau_0 = 0,7607$$

les quatre résultats étant :

$$0,7623 - 0,7586 - 0,7577 - 0,7643.$$

Précision : Etant donnés les soins apportés à ces mesures et la faible amplitude de leurs écarts (1 % environ), on peut penser que cette valeur est connue avec une incertitude de 5 ‰, soit :  $\tau_0 = 0,7607 \pm 0,0038$ .

### B. — Mesure par photométrie visuelle.

La lampe munie de son filtre SCHOTT très sélectif reste immobile.

a) Elle éclaire directement l'écran diffusant du papilloteur avec ou sans interposition du filtre étudié. Soit  $\tau$  le facteur de transmission mesuré.

b) Elle est au foyer d'une lentille. Le filtre est traversé par de la lumière parallèle. Soit  $\tau_0$  le nouveau facteur de transmission.

### RELATION ENTRE $\tau$ ET $\tau_0$ .

Dans le premier cas l'écran a un double rôle : il affaiblit le faisceau dans le rapport  $\tau_0$ , mais il rapproche la source

d'une distance  $\frac{(n-1)e}{n}$  où  $n$  représente l'indice moyen de l'écran et  $e$  son épaisseur.

Dans le cas présent, le calcul établit la relation :

$$\tau_0 = \tau \times 0,9755$$

### MESURES :

Il était intéressant de voir le rôle joué par la composition spectrale de la lumière de la lampe tare, soit sur la valeur même du résultat, soit sur la précision des pointés.

Dans ce double but, les mesures ont été effectuées par quatre observateurs dont deux entraînés aux mesures photométriques (GB et CK) et deux novices (ALG et AL). Chacun a utilisé les deux montages décrits plus haut et six teintes différentes de la lampe-tare.

Celle-ci était aussi une lampe HP 300, pour éviter l'effet stroboscopique et les diverses teintes étaient obtenues par l'emploi de gélaines colorées (bleu, vert, jaune, vert-jaune, pourpre, neutre).

### RÉSULTATS :

Ces résultats ainsi que l'écart moyen pour chaque série sont groupés dans le tableau IX, d'une part, par observateur, d'autre part par teinte de la lampe-tare. Le tableau X rassemble les résultats pour l'ensemble des 108 mesures.

Les écarts observés entre chaque moyenne étant inférieurs aux écarts moyens, il n'y a pas d'écart systématique caractérisant tel observateur ou telle teinte de la lampe-tare.

La moyenne des soixante mesures effectuées avec le montage (a) est :

$$\tau = 0,7795$$



TABLEAU IX

Montage <i>a</i> moyenne : 0,7795		G. B.	C. K.	A. L. G.	L.		
	<i>n</i>	32	11	8	9		
	<i>m</i>	0,7803	0,7784	0,7810	0,7767		
	$\Delta$	0,006	0,006	0,007	0,005		
		Bleu.	Vert.	Jaune.	Vert jaune	Pourpre.	Neutre.
	<i>n</i>	12	11	10	9	9	8
	<i>m</i>	0,7817	0,7780	0,7774	0,7812	0,7793	0,7797
	$\Delta$	0,005	0,006	0,006	0,005	0,006	0,006
Montage <i>b</i> moyenne : 0,7609		G. B.	C. K.	A. L. G.	L.		
	<i>n</i>	24	6	4	14		
	<i>m</i>	0,7621	0,7588	0,7591	0,7603		
	$\Delta$	0,004	0,007	0,008	0,007		
		Bleu.	Vert.	Jaune.	Vert jaune.	Pourpre.	Neutre.
	<i>n</i>	7	8	11	8	6	8
	<i>m</i>	0,7598	0,7600	0,7604	0,7673	0,7608	0,7573
	$\Delta$	0,006	0,003	0,005	0,006	0,006	0,006

*n* représente le nombre d'observations — *m* représente leur valeur moyenne —  $\Delta$  représente l'écart moyen absolu par rapport à *m*.

TABLEAU X

	G. B.	C. K.	A. L. G.	L.		
Moyenne	56	17	12	23		
Écart 0/00	0,7613 + 1,3	0,7594 — 1,8	0,7611 + 0,92	0,7594 — 1,8		

	Bleu.	Vert.	Jaune.	Vert jaune.	Pourpre.	Neutre.
Moyenne	19	19	21	17	15	16
Écart 0/00	0,7617 + 1,2	0,7595 — 1,7	0,7595 — 1,7	0,7646 + 5,0	0,7607 — 0,1	0,7592 — 2,1

Écart 0/00 = écart entre le résultat ci-dessus et la moyenne 0,7607.

La valeur déduite pour  $\tau_0$  est :

$$\tau_0 = 0,7795 \times 0,9755 = 0,7607$$

La moyenne des quarante-huit mesures effectuées avec le montage (*b*) donne directement :

$$\tau_0 = 0,7609$$

La parfaite identité existant entre ces deux moyennes permet d'affirmer que la valeur de  $\tau_0$  est :

$$\tau_0 = 0,7605 \pm 0,0008.$$

L'incertitude relative étant de :

$$d\tau_0/\tau_0 = 1 \text{ } 0/00$$

#### CONCLUSION.

Ces expériences montrent le parfait accord entre la méthode physique et la méthode photométrique.

Il semble que cette dernière soit susceptible d'une plus grande précision à condition d'avoir un nombre de mesures suffisant (une vingtaine).

N. B. — Il convient de remarquer que les deux lampes photométriques étant de même type, il n'est pas nécessaire de stabiliser avec soin la tension; en fait les deux lampes étaient alimentées directement par le réseau alternatif à 50 périodes par seconde.

## CHAPITRE VII

### VALIDITÉ DE LA MÉTHODE DE PAPILLOTEMENT

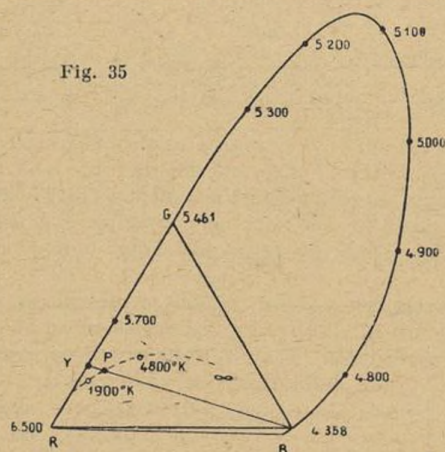
#### § I. — COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS PAR PAPILLOTEMENT ET PAR PLAGES JUXTAPOSEES.

En photométrie homochrome, la méthode logique de comparaison de deux intensités lumineuses est évidemment celle des plages juxtaposées avec ligne de séparation

évanescence à l'égalisation. Mais en photométrie hétérochrome, cette égalisation devient très délicate dès que la différence de teinte est sensible. Pour un même observateur les résultats sont très dispersés et peuvent ne pas être reproductibles. Le photomètre papilloteur, ainsi qu'il résulte de l'étude précédente conduit à des mesures bien



groupées et, pour un même observateur, parfaitement reproductibles d'une série de mesures à l'autre, dans des limites n'excédant pas l'écart probable sur chaque série. Mais le critérium qui lui sert de base est contestable, puisqu'il ne correspond nullement à l'utilisation pratique de la lumière. Il n'est pas sûr a priori que les deux méthodes de mesures fournissent dans tous les cas des résultats identiques. Il est un cas toutefois où l'on peut se prononcer avec certitude : lorsque les deux lumières comparées ont même composition spectrale, les deux techniques doivent évidemment donner, et donnent en fait des résultats identiques. Si les couleurs sont différentes, le peu de précision des mesures directes ne permet pas de mettre en évidence des écarts systématiques. On peut cependant considérer un cas intermédiaire où la comparaison sera possible : celui de deux lumières de compositions spectrales différentes, mais donnant à l'œil même sensation colorée. Il y a une infinité de manières de réaliser de tels équilibres. On peut en obtenir simplement à partir de lumières monochromatiques. Si l'on considère le triangle des couleurs (fig. 35),



où chaque couleur est représentée par un point dont les coordonnées triangulaires définissent les composantes colorimétriques  $r$ ,  $g$ ,  $b$ , une couleur résultant du mélange de deux autres est représentée par un point situé sur la droite joignant les points figurant sur les composantes. Sur le lieu du spectre, toute couleur spectrale comprise entre le vert (5.461 Å) et le rouge, le jaune 5.770-90 Å par exemple, peut pratiquement être équilibrée par un mélange de ces deux couleurs.

Le papilloteur étant bloqué, on peut comparer directement deux plages de mêmes couleurs subjectives ainsi réalisées, et ceci avec une bonne précision; le moteur étant mis en marche, la mesure peut s'effectuer aussi par papillotement. Un autre équilibre relativement aisé à réaliser est le suivant : la droite joignant le jaune précédent au bleu coupe en P la courbe du corps noir; il est donc possible de réaliser un mélange de bleu et de jaune équilibrant le corps noir à une température donnée (celle-ci est d'environ 2.300° K pour l'observateur moyen). Le réglage à réaliser sera déjà plus délicat, vu la nécessité d'agir simultanément sur la couleur et la brillance du corps noir et sur le dosage du mélange jaune-bleu. Les mesures ont été faites pour le premier point Y par une trentaine d'observateurs mais n'ont pu être poursuivies pour le second point P (1).

Le point délicat est le réglage colorimétrique. L'œil en effet s'accoutume très rapidement et après quelques instants de fixation juge parfait un équilibre qui n'est

(1) Cette étude particulière, abordée sur la suggestion de M. P. FLEURY, fera l'objet d'une communication ultérieure.

que grossièrement approché. Il importe d'opérer rapidement, de la manière suivante par exemple : jeter un coup d'œil bref (une seconde) sur le champ, estimer la modification à effectuer, la réaliser, attendre un peu (une minute), jeter un nouveau coup d'œil bref..., etc. De cette manière l'œil ne s'accoutume pas comme il arrive si l'on fait le réglage pendant l'observation du champ. Les avantages de ce procédé sont mis en évidence par le fait que pour un même observateur des réglages effectués à des mois d'intervalle, sont concordants à 1 ou 2 % près.

Les mesures concernant le premier équilibre faites par trente observateurs montrent un écart systématique entre les résultats fournis par deux méthodes, le papillotement attribuant en moyenne une luminosité plus faible à la lumière complexe. En notant comme positifs les écarts de même sens que la moyenne on relève 9 écarts négatifs et 21 positifs s'échelonnant de - 9 à + 15 %, la valeur moyenne étant de 3,0 %. La dispersion concorde approximativement avec la loi de GAUSS (nombre restreint de pointés) l'écart moyen est élevé 4 %. Comme les écarts relatifs à un observateur sont constants, on doit interpréter comme suit l'ensemble de ces mesures : pour un observateur donné, les deux méthodes photométriques donnent pour la comparaison envisagée des résultats différents, les écarts sont tantôt dans un sens tantôt dans un autre selon l'observateur, les écarts positifs (voir ci-dessus) étant deux fois plus fréquents que les autres; du point de vue statistique, pour l'ensemble des 30 observateurs envisagés, la moyenne des écarts constatés est voisine de 3 %.

Il serait intéressant de reprendre de semblables déterminations pour un certain nombre d'autres lumières composées, de voir si les divers écarts pour un même observateur sont tous de même sens, et d'étudier leurs variations.

## § 2. — HYPOTHESES CONCERNANT LE MECANISME SUBJECTIF DU PAPILOTTEMENT

Il est possible de formuler des hypothèses simples permettant d'expliquer les divergences signalées au paragraphe précédent. Les données de base sont les suivantes :

- a) additivité des intensités lumineuses par papillotement (chapitre VIII, paragraphe 4);
- b) divergences des deux méthodes;
- c) variation de la loi de persistance des sensations lumineuses suivant la longueur d'onde.

Voici les hypothèses proposées :

- a) Indépendance des composantes d'une lumière complexe au point de vue action sur l'œil;
- b) Additivité sur la rétine d'un éclaircissement actuel et de la persistance d'un éclaircissement antérieur.

En photométrie par plages juxtaposées, on peut admettre que la comparaison donne des valeurs exactes pour des lumières homochromes objectivement ou subjectivement. Pour des comparaisons hétérochromes, les résultats peuvent être faussés par un phénomène de contraste chromatique. En photométrie de papillotement, les hypothèses faites ci-dessus conduisent à admettre que pendant chaque phase (demi-période) du papillotement, l'éclaircissement de la rétine est la somme de l'éclaircissement propre à cette phase et de l'éclaircissement résiduel de la phase précédente. Pour une fréquence de l'ordre de 16 périodes par seconde, la durée

d'une phase est  $\frac{1}{2 \times 16} = 0,03$  seconde. Cette durée

étant tout à fait comparable aux durées d'établissement et de disparition des sensations lumineuses, on est obligé de tenir compte de l'existence de ces dernières. Les principaux renseignements à ce sujet résultent des travaux d'ALLEN [3] et de PIÉRON [35a] :



a) pour les diverses couleurs les durées d'établissement et de disparition varient dans le même sens, la première étant nettement plus courte que l'autre;

b) ces durées ont une variation parabolique avec la longueur d'onde, le minimum ayant lieu vers 5.900 Å.

c) pour le minimum, la durée pratique d'extinction est de 0,12 seconde : la loi de décroissance peut être représentée par une courbe en S, la sensation étant réduite de moitié environ au bout d'un temps égal au 1/10 du précédent;

d) valeurs relatives de ces durées :

Vert 5461	Jaune 5880	Rouge 7000
14	12	18

En utilisant qualitativement ces diverses données on peut chercher à voir quel lien existe entre les résultats obtenus par une comparaison au papilloteur et les valeurs intrinsèques des éclairissements mesurés. Pour un éclairissement donné, l'établissement et la suppression de l'excitation sont presque instantanés, la durée de masquage ou de démasquage de l'écran par les arêtes des volets mobiles ne représentant en effet que 1/13 de la durée d'éclairissement. La figure 36a, montre la variation dans le temps de l'éclairissement rétinien par deux flux successifs jaune et rouge.

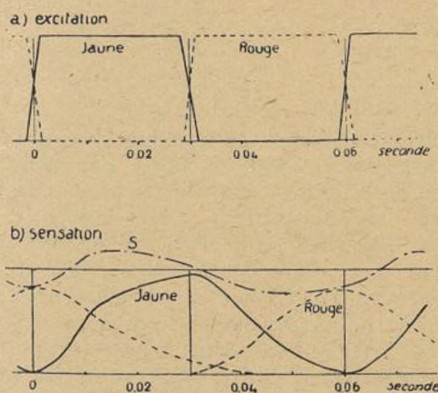


Fig. 36 a et b

Le second dessin (courbes tracées d'après PIÉRON) sans prétendre donner une représentation exacte du phénomène, montre l'établissement et la disparition de chaque sensation, plus longs pour le rouge que pour le jaune. La courbe S qui représente la sensation résultante montre que la phase jaune est avantagée. Pour qu'il y ait équilibre l'observateur mettra moins de jaune (il éloignera la lampe) et attribuera de ce fait à l'éclairissement rouge une valeur inférieure à la valeur réelle. Il va de soi qu'en comparaison objectivement homochrome les deux phases sont également altérées et la mesure est correcte. Dans la somme vert-rouge, en vertu de l'hypothèse faite sur l'indépendance des composantes, le vert et le rouge se comportent comme s'ils étaient seuls et leur somme est sous-estimée : c'est bien ce qui a été trouvé expérimentalement en moyenne. Les mesures en unités lumineuses jaunes des intensités verte, rouge ou jaune complexe sont donc erronées, mais l'additivité des unes entraîne celle des autres. Quant à la valeur exacte de l'écart, elle dépend de la variation de la persistance en fonction de la longueur d'onde, phénomène qui varie d'un sujet à l'autre et de

la loi de décroissance de la sensation résiduelle, loi mal connue et dépendant certainement aussi du sujet. Ceci explique la dispersion des écarts trouvés. On peut néanmoins avoir une idée approximative des variations de cet

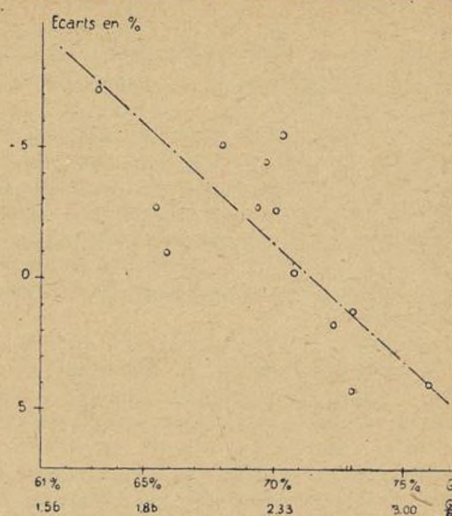


Fig. 37

écart en fonction des caractéristiques colorimétriques du sujet. L'écart expliqué par cette théorie est d'autant plus grand que les temps d'établissement et de disparition des sensations sont plus importants. Pour le rouge (durée 0,18 seconde) l'écart doit être plus grand que pour le vert (durée 0,14 seconde) : ceci est incontrôlable directement, mais, pour un mélange de vert et de rouge l'écart doit croître avec la proportion de rouge : la variation est faible, mais semble nette sur la figure 37 où chaque point représente un observateur avec en abscisse la composition qu'il donne au mélange rouge-vert pour équilibrer le jaune, et en ordonnée l'écart qu'il constate entre les deux méthodes.

Dans le cas le plus général où la comparaison, même hétérochrome porte sur des lumières à spectre continu, on peut concevoir d'après les hypothèses précédentes que la méthode de papillotement donne des déterminations légèrement inexacts, certainement moins d'ailleurs (par continuité) que dans le cas étudié ci-dessus. Par contre, indépendamment de la structure même des lumières composées, la méthode des plages juxtaposées donne des résultats inexacts par suite du contraste chromatique d'autant plus sensible que les couleurs sont plus distinctes, ce qui explique les divergences parfois considérables entre les deux méthodes.

Si l'on admet ce qui précède on voit que la méthode de papillotement donne une définition pratiquement correcte des intensités lumineuses quelconques. Au point de vue industriel et commercial, la précision obtenue suffit amplement. Du point de vue théorique, en photométrie de précision, il ne semble pas impossible qu'une étude très approfondie de la persistance des sensations lumineuses quant à la durée et à la loi de décroissance permette d'évaluer numériquement les écarts constatés expérimentalement et expliqués par la théorie présentée ici.

### TROISIÈME PARTIE

#### QUELQUES PROBLÈMES DE PHOTOMÉTRIE HÉTÉROCHROME

La première question qui vient à l'esprit est la suivante : les grandeurs mesurées en photométrie hétérochrome sont-elles additives? Cette propriété est essentielle pour que les mesures aient un sens. Or, c'est un fait

reconnu depuis longtemps que la courbe de visibilité d'un observateur déterminé est susceptible de se déformer en fonction de divers facteurs, tels que la grandeur angulaire du champ de mesure et sa brillance. Ces modifications sont



incompatibles avec une loi formelle d'additivité. Le problème consiste à trouver une technique et des conditions de mesures bien déterminées pour lesquelles les effets signalés ci-dessus soient négligeables. Ces recherches font l'objet du chapitre VIII.

Ce point étant obtenu, c'est-à-dire la courbe de visibilité d'un observateur étant parfaitement déterminée dans des conditions précises, il reste à comparer entre elles celles des divers observateurs.

Le résultat d'une mesure photométrique hétérochrome fait intervenir quelques valeurs du facteur de visibilité relative de l'observateur, si la source est à spectre de raies, et l'ensemble des valeurs de ce facteur si la source est à spectre continu. Il s'ensuit que le résultat de la mesure dépend de l'observateur : une valeur numérique n'a donc de sens qu'autant que l'on peut caractériser l'observateur qui l'a déterminée.

Il est commode, et c'est à quoi la C.I.E. s'est attachée depuis de nombreuses années, de définir un observateur-type dont la courbe de visibilité soit connue par définition. Pour que les résultats hypothétiques fournis par cet observateur fictif ne s'écartent pas trop de ceux fournis par les observateurs réels et gardent par là une valeur pratique, on a attribué à l'observateur-type une courbe de visibilité

dont chaque point représente la moyenne des valeurs déterminées par des observateurs réels. La diversité des courbes de visibilité est telle que les courbes-types obtenues dans divers laboratoires diffèrent les unes des autres quoique portant sur une centaine d'observateurs environ.

Il ne semble pas que la photométrie doive gagner beaucoup à une détermination plus précise de la courbe de visibilité. Il restera toujours dans le tracé de celle-ci une certaine part d'arbitraire, une telle courbe étant une courbe définie représentant au mieux les caractéristiques photométriques, mal définies, de l'œil moyen. Par contre, deux problèmes voisins intéressent de très près les progrès réalisables en photométrie : la situation d'un observateur par rapport à l'observateur-type et le moyen de ramener ses résultats aux résultats-types.

Pour résoudre le premier de ces deux problèmes, il est proposé au chapitre IX une méthode particulièrement rapide. La seconde question a reçu de IVES une réponse assez satisfaisante la méthode du rapport jaune-bleu Y/B; une nouvelle méthode lui est comparée au chapitre X où on trouvera également un essai d'application du photomètre papilloteur à la solution de problème colorimétrique simple.

## CHAPITRE VIII

### LA LOI D'ADDITIVITÉ EN PHOTOMÉTRIE DE PAPILOTEMENT

Cette loi concerne la possibilité de définir une sensation lumineuse comme somme de deux ou plusieurs autres. Lorsqu'il s'agit de sensations identiques quant à leur nature (sources lumineuses homochromes) la réponse paraît tellement évidente que bien peu d'auteurs se sont posé la question. IVES semble être le seul à avoir fait des mesures dans ce domaine, avec un photomètre à papillotement d'ailleurs. Par contre, lorsque les intensités lumineuses qui s'ajoutent sont de nature distincte (sources lumineuses hétérochromes) la différence de couleur de la résultante obtenue présente à l'esprit la non-additivité comme un phénomène « possible ». De nombreux observateurs ont cherché à en contrôler l'existence. La réponse a différé suivant les méthodes mises en œuvre et le degré de précision atteint.

Du point de vue théorique, une réponse affirmative ramènerait évidemment tous les problèmes de photométrie à leur plus simple expression. Si cette loi au contraire n'est pas valable, beaucoup de définitions photométriques perdent leur signification, par exemple la notion de facteur de visibilité, et par voie de conséquence la définition même d'un flux lumineux complexe.

#### § I. — HISTORIQUE.

En 1886 ABNEY [2] a publié le résultat de recherches entreprises depuis plusieurs années à ce sujet. Les flux lumineux additionnels étaient prélevés dans un spectre

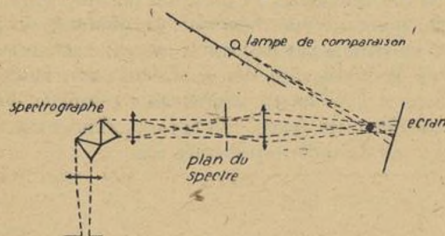


Fig. 38

(fig. 38) au moyen de fentes mobiles de largeur réglable. La source de comparaison était une lampe blanche (ou une bougie) mobile sur une règle graduée. Le photomètre

consistait essentiellement en un écran blanc (carton recouvert d'une pâte à l'oxyde de zinc) : une mince baguette de 1 cm de diamètre y projetait ses deux ombres : c'était en somme un photomètre à ombres juxtaposées du type RUMFORD. L'appareil fut perfectionné ultérieurement par adjonction d'un disque de TALBOT à secteur réglable. En démasquant successivement ou simultanément plusieurs fentes dans le spectre, ABNEY avait à sa disposition le moyen de juger la loi d'additivité : les mesures effectuées avec ce montage par divers observateurs lui ont permis d'affirmer que la loi d'additivité est vérifiée dans la limite des incertitudes de mesures (4 à 5 %) et que la couleur de la source de comparaison est sans aucune influence sur les résultats. Le mémoire d'ABNEY manque malheureusement de précision sur les dimensions du champ d'observation, sur sa brillance et sur la dispersion des séries de pointés. Tout au plus peut-on déduire du montage utilisé que l'écran recevait un éclaircissement moyen de 2 lux, correspondant à une brillance de 64 microstilbs.

Plus récemment (1928) HIECKE [23] a repris la question avec des filtres colorés donnant des lumières à peu près complémentaires, les résultats obtenus, assez peu précis toutefois, sont en contradiction avec ceux d'ABNEY et infirment la loi d'additivité.

Il y a quelques années (1939), PIÉRON a entrepris une étude détaillée au moyen d'un spectrophotomètre. L'appareil, très complexe, comporte trois circuits identiques constitués chacun par un spectroscopie à déviation constante avec un jeu de nicols pour l'affaiblissement du faisceau lumineux. A chaque circuit une glace semi-transparente donne le moyen d'ajouter de la lumière blanche en quantité réglable également. Un cube de LUMMER permet le mélange et la comparaison de ces divers flux lumineux.

Un disque échancré tournant permet en outre de faire la mesure par papillotement. Un tel montage offre évidemment de multiples possibilités quant aux combinaisons à effectuer avec les divers circuits lumineux, mais par là même, fait intervenir un grand nombre de variables, ce qui nuit à la précision des mesures. Celles-ci ont été faites en nombre restreint, et leur dispersion est grande. Les



résultats obtenus dans ces conditions, qui font apparaître des écarts notables à la loi d'additivité (de 10 % par papillotement à 50 % par comparaison directe), semblent peu probants.

## § 2. — DOMAINE D'INVESTIGATION ET MESURES.

Les recherches qui font l'objet du présent chapitre ont pour but de définir un domaine minimum où la loi d'additivité est valable en photométrie de papillotement. Les expériences ont porté :

- a) sur l'additivité de deux flux élémentaires monochromatiques;
- b) sur l'additivité de deux flux complexes, à spectre de raies;
- c) sur l'additivité de deux flux complexes, à spectre continu.

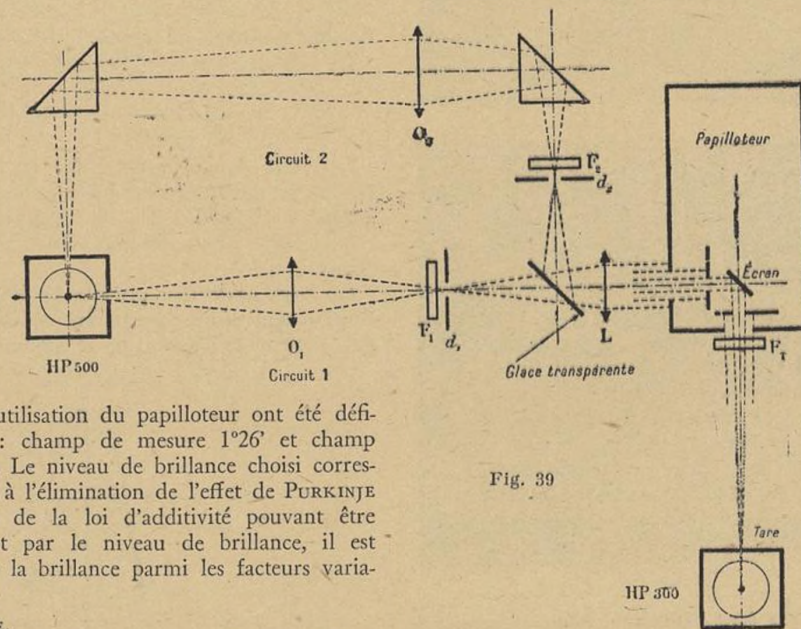


Fig. 39

Les conditions d'utilisation du papilloteur ont été définies précédemment : champ de mesure 1°26' et champ périphérique obscur. Le niveau de brillance choisi correspondait précisément à l'élimination de l'effet de PURKINJE inverse. La validité de la loi d'additivité pouvant être influencée également par le niveau de brillance, il est nécessaire de classer la brillance parmi les facteurs variables du problème.

### MÉTHODE DE MESURE.

Les circuits 1 et 2 du photomètre papilloteur (fig. 39 et 40) correspondent respectivement à des brillances du champ  $B_1$  et  $B_2$  déterminées d'après les distances  $d_1$  et  $d_2$  de la lampe-tare à l'écran diffusant :

$$B_1 = k/d_1^2 \quad B_2 = k/d_2^2$$

Si les circuits 1 et 2 sont ouverts simultanément, la distance de la lampe-tare permet de calculer la brillance totale  $B = k/d^2$ . Si la loi est rigoureuse on doit trouver :  $B = B_1 + B_2$ .

Les écarts constatés sont en valeur relative :

$$\frac{B}{B_1 + B_2} - 1 = \frac{1/d^2}{1/d_1^2 + 1/d_2^2} - 1 = \epsilon$$

en posant  $1/d^2 = 1/d_1^2 + 1/d_2^2$  on calcule  $\epsilon$  par la formule :

$$\epsilon = 2 \cdot \frac{\delta - d}{d}$$

Chaque mesure comporte donc trois égalisations au photomètre papilloteur. Chaque égalisation est répétée rapidement cinq fois et la valeur retenue pour le calcul est la moyenne des cinq lectures. La nature de chacun des flux lumineux à comparer est déterminée par le choix des filtres colorés utilisés, et leur intensité réglée au moyen de diaphragmes.

### a) Exemple de mesure :

$$d_1 = 89,3 \text{ cm } (100/d_1)^2 = 1,255$$

$$d_2 = 129,0 \text{ cm } (100/d_2)^2 = 0,600$$

$$(100/d)^2 = 1,855 \text{ d'où } \delta = 73,4 \text{ cm.}$$

$$d = 73,6 \text{ cm d'où}$$

$$\epsilon = 2 \frac{\delta - d}{d} = 2 (-0,2)73,6 = -0,54 \%$$

### MESURE DES BRILLANCES.

#### A. — Brillances faibles et normales.

Afin d'évaluer la brillance du champ d'observation du photomètre papilloteur, la lampe-tare a été remplacée par une lampe-étalon du *Laboratoire Central d'Electricité*. Cette lampe, alimentée par une batterie d'accumulateurs de grosse capacité, sous une tension fixe de 100,02 volts mesurée au potentiomètre donne une intensité horizontale de 50 bougies, dans une direction perpendiculaire au plan du filament.

On réalise l'égalisation avec un flux convenablement

choisi du circuit I. Puis, par substitution de la tare à l'étalon, on réalise ainsi une double pesée qui permet de graduer directement le banc photométrique en brillances du champ.

a) *Détail des calculs* : Dans une mesure, un certain flux du circuit 1 a été égalisé successivement avec la lampe-étalon à 150,0 cm puis avec la lampe-tare munie du filtre vert de SCHOTT à 63,3 cm.

Dans ces conditions, l'éclairement du champ est :

$$E = \frac{I \cos i}{d^2} = \frac{50 \times \frac{\sqrt{2}}{2}}{1,5^2} \text{ lux soit } 15,75 \text{ lux}$$

Admettons que notre écran de magnésie soit un diffuseur non sélectif (ce qui est presque rigoureux) avec un facteur de diffusion de 0,985, la brillance de l'écran (indépendante de la direction d'observation) sera (pour cette position de la tare) :

$$B = \frac{E \times 0,985}{\pi \times 10^4} \text{ stilbs, soit : } 490 \text{ microstilbs.}$$

#### B. — Brillances élevées.

Le photomètre papilloteur à écran diffusant ne permet pas, avec les sources utilisées (environ 250 bougies), d'obtenir des brillances très élevées. Toutefois, ces mêmes sources (qui ont une grande brillance de l'ordre de 350 stilbs) peuvent donner le résultat cherché au moyen



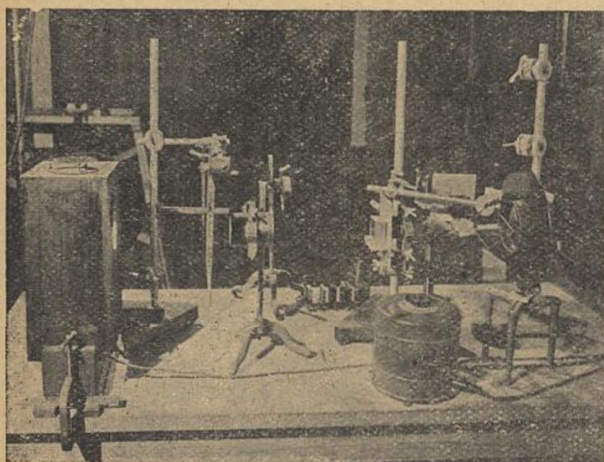
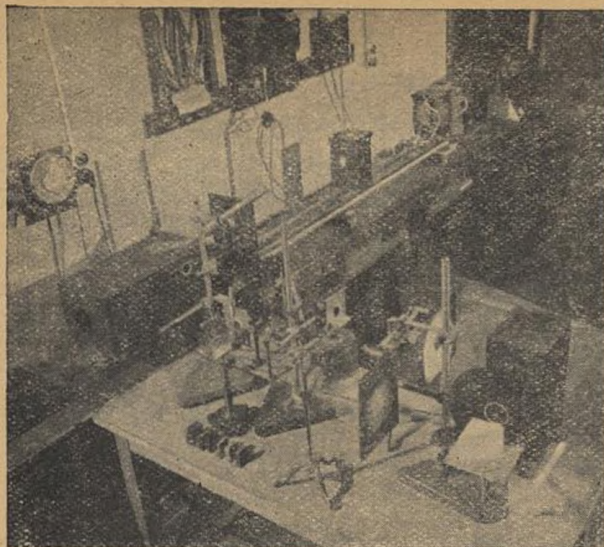


Fig. 40

d'un photomètre sans écran diffusant. Nous avons utilisé dans ce but le colorimètre P. FLEURY à cube de LUMMER : employé comme photomètre à contraste il ne permet que des mesures pratiquement homochromes.

La brillance du champ est mesurée par égalisation avec la lampe-étalon éclairant un écran diffusant en magnésium placé sur l'un des circuits.

a) *Détail des calculs* : Un certain flux d'un circuit du colorimètre est égalisé avec celui provenant de l'écran diffusant. La lampe-étalon est à 71,5 cm de cet écran dont l'éclairement est donc :

$$E = 1/d^2 = 50/0,715^2 \text{ lux, soit } 97,9 \text{ lux.}$$

La brillance dans une direction quelconque est :

$$E \times 0,985$$

$$B = \frac{E \times 0,985}{\pi \times 10^4} \text{ stilbs, soit : } 3000 \text{ microstilbs.}$$

Le faisceau traverse une lentille puis une glace transparente, le cube de LUMMER et une dernière lentille, ce qui fait au total 8 dioptries.

En admettant 4 % de perte à chacun d'eux, le flux lumineux est affaibli dans le rapport  $0,96^8$ , soit 0,716.

La brillance du champ observé est donc :

$$B = 3000 \times 0,716 \text{ } \mu\text{sb} = 2200 \text{ microstilbs.}$$

L'étalonnage des coins de l'appareil permet de calculer ensuite la brillance pour chaque mesure.

### § 3. — RESULTATS.

Le nombre total des mesures se monte à 190.

Pour chacune d'elles, l'observateur a réalisé trois séries de cinq pointés : une pour déterminer chaque composante

lumineuse et une pour la résultante. Le nombre caractérisant cette dernière est tantôt plus grand, tantôt plus faible que la somme des deux premières. Cet écart est converti en pour cent de la somme vraie et affecté du signe plus si la résultante est supérieure, du signe moins dans le cas contraire.

Les 190 écarts se répartissent de la manière suivante :

95 écarts négatifs de total	— 122,843 %
4 écarts nuls de total	0,000 %
91 écarts positifs de total	+ 126,800 %

Les écarts moyens dans chaque sens sont donc :

$$\text{écart négatif moyen} = - \frac{122,843}{95} = - 1,29 \%$$

$$\text{écart positif moyen} = + \frac{126,800}{91} = + 1,39 \%$$

ils sont sensiblement égaux.

La valeur moyenne algébrique de ces écarts est :

$$\frac{126,800 - 122,843}{190} = + 0,021 \%$$

On peut donc admettre que la valeur moyenne des écarts est rigoureusement nulle et les répartir par rapport à zéro. La courbe « a » de la figure 41 représente cette répartition : elle a l'aspect classique d'une courbe de GAUSS.

On peut également prendre le problème à l'envers en le supposant résolu ; c'est-à-dire en admettant la loi d'additivité comme rigoureuse et, connaissant la courbe de

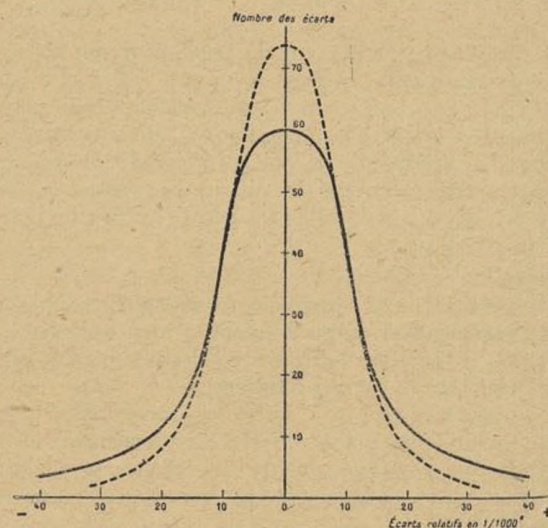


Fig. 41. — (a : trait plein ; b : pointillé).

dispersion pour une série de pointés, voir quelle courbe correspond à une mesure dépendant de trois séries de pointés. On a vu au chapitre II que les écarts sur une série suivent très correctement une loi de GAUSS.

Une série de 190 pointés pris au hasard dans la série des 1000, donne aussi une répartition de GAUSS « b », figure 41, dans laquelle l'écart moyen est 0,88 %.

Soit  $\varepsilon$  l'écart sur une série, l'écart sur une mesure résultant de trois séries peut s'obtenir de plusieurs façons :

1 <sup>re</sup> série	2 <sup>e</sup> série	3 <sup>e</sup> série	Total
+ $\varepsilon$	+ $\varepsilon$	+ $\varepsilon$	+ 3 $\varepsilon$
+ $\varepsilon$	+ $\varepsilon$	— $\varepsilon$	+ $\varepsilon$
+ $\varepsilon$	— $\varepsilon$	+ $\varepsilon$	+ $\varepsilon$
— $\varepsilon$	— $\varepsilon$	— $\varepsilon$	— 3 $\varepsilon$
+ $\varepsilon$	—	— $\varepsilon$	— $\varepsilon$
— $\varepsilon$	+ $\varepsilon$	+ $\varepsilon$	+ $\varepsilon$
— $\varepsilon$	— $\varepsilon$	+ $\varepsilon$	— $\varepsilon$
— $\varepsilon$	+ $\varepsilon$	— $\varepsilon$	— $\varepsilon$



soit pour ces huit cas également possibles, deux cas où l'écart est 3 ε et 6 cas où il n'est qu'ε, soit en moyenne :  $\frac{2 \times 3 \varepsilon + 6 \times \varepsilon}{8} = 1,5 \varepsilon$ .

Sur une mesure, l'écart moyen doit donc être  $0,88 \% \times 1,5 = 1,32 \%$

- RESUME DES OBSERVATIONS -  
RELATIVES A LA VERIFICATION DE LA LOI D'ADDITIVITE

N°	Observateurs	Couleurs	Comparaisons	Couleurs	ρ	Ecart %	
						+	-
			Homochromes Hétérochromes Spectrales Complexes				
1	G.C.B.	R + G			1,2	1,58	
2	G.C.B.	"			1,3	9,30	
3	G.C.B.	"			5,4		33,00
4	G.C.B.	"			5,8		1,50
5	J.G.	"			6,0		2,88
6	E.L.	"			1,1		53,60
7	E.L.	"			6,1	31,90	
8	E.L.	"			9,4	14,85	
9	A.L.G.	"			1,3	57,10	
10	A.L.G.	"			5,0		44,80
11	G.C.B.	"			5,4		24,10
12	G.C.B.	"			8,1	13,30	
13	G.C.B.	"			1,2		34,00
14	G.C.B.	"			12,9	23,45	
15	E.L.	"			1,1		2,66
16	E.L.	"			1,8		17,60
17	G.C.B.	"			2,4		7,48
18	G.C.B.	"			1,2	10,80	
19	G.C.B.	"			14,0		3,32
20	G.C.B.	"			11,2		8,46
21	G.C.B.	"			2,1	11,36	
22	G.C.B.	"			2,8	27,90	
23	G.C.B.	"			2,7	7,25	
24	G.C.B.	"			3,8	9,25	
25	J.G.	"			4,6		0,00
26	J.G.	"			6,3	20,00	
27	G.C.B.	"			1,8	24,30	
28	C.K.	"			2,9	39,00	
29	P.F.	"			2,4	2,04	
30	A.L.G.	"			2,7	22,00	
31	E.L.	"			2,4		10,30
32	A.L.G.	"			2,8	9,55	
33	A.L.	"			3,2		10,92
34	P.K.	"			2,9	49,50	
35	C.K.	"			3,3	1,82	
Report						386,25	254,82

Report

N°	Observateurs	Couleurs	Comparaisons	Couleurs	ρ	Ecart %	
						+	-
			Homochromes Hétérochromes Spectrales Complexes				
36	G.C.B.	R + G			1,8	0,94	
37	A.L.	"			2,7		6,05
38	G.C.B.	"			1,8		7,35
39	C.K.	"			3,2	1,42	
40	E.L.	"			2,6		1,56
41	G.C.B.	"			1,9		0,38
42	C.K.	"			5,2		45,70
43	A.L.G.	"			2,5		2,06
44	E.L.	"			5,0		6,40
45	E.L.	"			2,3		6,83
46	A.L.	"			2,5		4,84
47	M.B.	"			2,4		0,50
48	C.K.	"			3,0		13,00
49	G.C.B.	"			9,3		10,05
50	G.C.B.	"			3,7	41,00	
51	G.A.B.	"			2,4	38,50	
52	M.B.	"			2,6		2,94
53	H.H.	"			3,5	26,20	
54	C.K.	"			1,0	4,71	
55	G.C.B.	"			1,0		9,85
56	A.L.G.	"			1,0	2,74	
57	C.K.	"			1,0		13,35
58	C.K.	"			1,0		7,85
59	A.L.	"			1,0		7,58
60	G.C.B.	"			1,0		5,76
61	A.L.	"			1,0		30,25
62	C.K.	"			1,0		
63	C.K.	"			1,0	3,59	
64	G.C.B.	"			1,0		14,10
65	G.C.B.	"			1,0		9,10
66	A.L.G.	"			1,0		3,62
67	A.L.	"			1,0		44,25
68	G.C.B.	"			1,0		8,16
69	G.C.B.	"			1,0		9,93
70	A.L.	"			1,0	60,60	
71	C.K.	"			1,0	4,19	
72	G.C.B.	"			1,0		60,50
73	A.L.	"			1,0		2,22
74	C.K.	"			1,1		35,10
75	A.L.	Blanc			1,0		30,95
Report						585,93	653,26

Report

« a ».

En résumé, la courbe d'écarts à la loi d'additivité n'est pas autre chose que la courbe de dispersion de mesures dépendant de trois séries de pointés. Ce résultat prouve que :

- 1° la loi d'additivité est valable (moyenne nulle);
- 2° les écarts sont accidentels (forme de la courbe).

- 3 -

N°	Observateurs	Couleurs	Comparaisons	Couleurs	ρ	Ecart %	
						+	-
			Homochromes Hétérochromes Spectrales Complexes				
76	G.C.B.	Blanc			1,0		
77	C.K.	"			1,0		14,38
78	A.L.G.	"			1,0		5,64
79	E.L.	"			1,0		23,90
80	J.G.	"			1,0		7,44
81	A.L.	"			1,0		1,84
82	G.C.B.	"			1,0	0,00	
83	G.C.B.	"			1,0	3,22	
84	G.C.B.	"			1,7		1,37
85	G.C.B.	"			1,5		0,76
86	G.C.B.	"			2,4	9,95	
87	G.C.B.	"			2,6	0,00	
88	G.C.B.	"			7,7	11,00	
89	G.C.B.	"			1,0		13,10
90	G.C.B.	"			1,5		3,38
91	G.C.B.	"			2,0	1,04	
92	G.C.B.	"			4,2		0,62
93	G.C.B.	"			1,1		0,14
94	G.C.B.	"			1,1		3,33
95	G.C.B.	"			1,1		5,73
96	G.C.B.	"			4,3		6,92
97	G.C.B.	"			9,0	10,00	
98	G.C.B.	"			96,0	8,53	
99	G.C.B.	"			79,0		1,56
100	G.C.B.	"			125,0	5,41	
101	G.C.B.	"			106,0	7,40	
102	G.C.B.	"			1,2		0,14
103	G.C.B.	"			2,4	5,55	
104	G.C.B.	"			1,1		7,38
105	A.L.	"			3,0	13,05	
106	G.C.B.	"			1,3	8,98	
107	A.L.	"			1,4	6,34	
108	C.K.	"			1,4	10,51	
109	A.L.G.	"			1,4	21,55	
110	G.C.B.	"			1,1	22,30	
111	A.L.	"			1,1	14,27	
112	E.L.	"			1,0		2,61
113	A.L.	"			1,1	6,45	
114	G.C.B.	"			1,1	18,35	
115	E.L.	"			1,1	22,30	
Report						800,45	753,01

Report

- 4 -

N°	Observateurs	Couleurs	Comparaisons	Couleurs	ρ	Ecart %	
						+	-
			Homochromes Hétérochromes Spectrales Complexes				
116	A.L.	Blanc			3,5		
117	G.C.B.	"			3,6		16,90
118	E.L.	"			3,6		10,10
119	G.C.B.	"			3,6		12,05
120	G.C.B.	"			1,5		3,80
121	G.C.B.	"			1,4		12,55
122	A.L.	"			1,6		23,70
123	C.K.	"			1,7		16,60
124	G.C.B.	"			1,8		26,60
125	J.G.	"			1,8		0,69
126	G.C.B.	"			1,8		10,00
127	D.	"			2,5		
128	L.	"			2,5	11,90	
129	G.C.B.	"			5,4		59,10
130	G.C.B.	"			8,6		3,62
131	J.G.	"			2,2		1,81
132	A.D.	"			2,2		11,25
133	L.B.	"			2,5		1,98
134	M.L.B.	"			2,1		13,75
135	A.L.G.	"			1,9	29,30	
136	G.C.B.	"			2,6	32,00	
137	M.A.B.	"			1,9	10,26	
138	R.D.	"			1,9	9,65	
139	P.F.	"			4,2		32,20
140	G.C.B.	"			2,4		36,10
141	A.L.	"			2,8	2,87	
142	G.C.B.	"			2,2	2,92	
143	A.L.	"			2,5		9,40
144	C.K.	"			2,7		
145	G.C.B.	"			2,5		0,51
146	G.C.B.	"			2,5		2,19
147	G.C.B.	"			1,6		9,70
148	G.C.B.	"			1,2		13,10
149	G.C.B.	"			1,2		6,61
150	G.C.B.	"			2,4		1,07
151	G.C.B.	"			1,8		10,61
152	G.C.B.	"			1,8		
153	G.C.B.	"			1,8	4,31	
154	G.C.B.	"			12,00	6,87	
155	C.K.	"			4,4		12,00
					4,0		18,80
					1,1		14,35
					1,0		0,30
					1,0	6,30	
Report						1069,10	992,23

Report

voisin des écarts moyens positifs ou négatifs trouvés précédemment.

En faisant subir à chaque écart de la courbe « b » une multiplication par 1,5 la courbe se déforme, le nombre d'écarts dans la bande centrale diminuant, et augmentant au contraire dans les bandes extrêmes : la courbe « b » vient alors se superposer très sensiblement à la courbe

DISCUSSION DES RÉSULTATS.

Il serait à craindre toutefois, vu le nombre relativement restreint des mesures effectuées, que la moyenne ne soit nulle que par suite d'une compensation accidentelle entre diverses séries (compensation rendue bien improbable par la régularité de la courbe).

Les 190 résultats ont été obtenus en faisant varier tous



N°	Observateurs	Couleurs	Comparaisons	Couleurs	$\rho$	Ecart %
			Homochromes	Hétérochromes	Spectrales	Complexes
<b>Report</b>						
156	G.C.B.	R + G	*	*	1,0	1069,10
157	G.C.B.	R + G	*	*	1,0	992,23
158	R.J.F.	"	"	"	2,50	13,00
159	G.C.B.	"	"	"	1,0	8,80
160	A.L.G.	G + B	"	"	1,0	3,70
161	G.C.B.	"	"	"	1,0	7,50
162	G.C.B.	"	"	"	1,0	11,00
163	A.L.	"	"	"	1,0	3,30
164	C.K.	"	"	"	1,4	6,70
165	A.L.G.	"	"	"	1,4	24,50
166	A.L.	"	"	"	1,0	5,80
167	G.C.B.	"	"	"	1,0	13,00
168	J.G.	V + Y	"	"	1,1	2,60
169	R.J.F.	"	"	"	1,2	8,00
170	R.J.F.	G + B	"	"	2,0	29,00
171	G.C.B.	"	"	"	1,1	10,60
172	G.C.B.	Blanc	"	"	4,2	10,00
173	G.C.B.	"	"	"	3,3	7,80
174	A.L.	"	"	"	3,3	2,50
175	G.C.B.	"	"	"	3,4	10,9
176	C.K.	"	"	"	3,2	4,10
177	J.G.	"	"	"	3,2	12,0
178	A.L.G.	G + R	"	"	3,1	5,00
179	A.L.G.	"	"	"	2,8	30,00
180	G.C.B.	"	"	"	1,7	16,00
181	R.J.F.	"	"	"	2,4	22,00
182	A.L.	"	"	"	2,1	1,90
183	J.R.G.	"	"	"	2,4	0,70
184	J.G.	"	"	"	2,4	1,80
185	G.C.B.	B + R	"	"	1,0	10,00
186	G.C.B.	G + C	"	"	1,0	40,20
187	G.C.B.	Blanc	"	"	1,0	4,50
188	G.C.B.	"	"	"	2,3	23,30
189	G.C.B.	"	"	"	1,2	61,40
190	G.C.B.	"	"	"	1,2	1266,00
<b>Total</b>						1228,43

les facteurs expérimentaux sauf le champ :

- utilisation de plusieurs observateurs (21 en tout) en entraînés (4) ou non;
- addition homochrome ou hétérochrome;
- flux additionnels monochromatiques, à spectre de raies, ou à spectre continu;
- rapport des brillances ajoutées :  
brillances voisines :  $\rho = B_1/B_2$  voisin de 1,  
brillances différentes,  
brillances très différentes :  $\rho$  grand (jusqu'à 125).
- niveau final de brillance :  
faible depuis 0,01 b/m<sup>2</sup>,  
moyen de 0,25 à 130 b/m<sup>2</sup>,  
élevé jusqu'à 10<sup>6</sup> b/m<sup>2</sup>.

Le rapprochement des résultats obtenus en maintenant fixe un facteur déterminé montre qu'il n'y a pas d'influence systématique de celui-ci.

C'est ce qui est mis en évidence par le tableau ci-dessous :

Facteur fixe	Nombre de pointés	Ecart moyen %
Observateur (A.L. non entraîné)....	22	-0,15
Addition hétérochrome .....	104	+0,14
Addition homochrome blanche....	37	+0,25
Brillances monochromatiques .....	137	-0,15
Addition de rouge et de vert monochromatiques .....	80	-0,05
Rapport des brillances entre 1 et 2.	95	-0,10
Brillance de 0,01 à 1 b/m <sup>2</sup> .....	60	+0,04
Brillance de 200 b/m <sup>2</sup> .....	12	+0,12

L'étude de ce tableau apporte toutefois un certain nombre de renseignements intéressants.

## CHAPITRE IX

### ESSAI DE CLASSIFICATION DES OBSERVATEURS

La détermination complète (longueur d'onde par longueur d'onde), de la courbe de visibilité d'un observateur est une opération très longue [11], [19b], [24], [50], nécessitant des mesures énergétiques délicates. La méthode exposée ci-après permet rapidement (environ une demi-heure) de situer avec précision la courbe de visibilité d'un observateur quelconque par rapport à la courbe standard, sans qu'il soit nécessaire de connaître celle-ci. Ces résultats

1° Le papillotement en lumières homochromes donne une dispersion plus grande (+0,25 %) que le papillotement en lumières hétérochromes (-0,05 % pour vert-rouge) : résultat en accord avec la remarque faite au chapitre premier, sur l'accroissement de sensibilité qui résultait du phénomène de teinte sensible, particulièrement net dans le cas vert-rouge.

2° Très faible dispersion pour les mesures effectuées aux brillances comprises entre 0,01 et 1 bougie par mètre carré.

## § 4. — LOI D'ADDITIVITE

### ET PHENOMENE DE PURKINJE.

Le phénomène de PURKINJE [38] consiste en une exaltation des bleus par rapport aux rouges aux faibles brillances, c'est-à-dire en un déplacement de la courbe de visibilité relative. Celle-ci dépend donc du niveau de brillance. Lorsque l'on fait une addition lumineuse, la brillance varie et le phénomène de PURKINJE doit intervenir en altérant la loi d'additivité. Or, ici rien de semblable n'est constaté : les mesures ont-elles été faites dans un domaine où l'effet de PURKINJE n'intervient pas, où l'influence de celui-ci est-elle inappréciable?

Deux faits sont à envisager : l'effet PURKINJE est inversé en photométrie de papillotement : résultat classique constaté précédemment (chapitre II). D'autre part, il est attribué couramment à la vision par les bâtonnets et une vision purement fovéale l'éliminerait entièrement [46b]. Or ici le champ a été choisi de 1°26' ce qui correspond aux dimensions courantes de la fovea : l'effet PURKINJE inverse n'intervient donc pas si toutefois l'observateur fixe réellement le champ de mesure, mais c'est là une condition difficile à remplir dans certains cas (principalement dès que le champ contient du bleu en quantité appréciable).

Il est pourtant facile de voir que même si l'effet PURKINJE existe, il n'intervient que faiblement.

Soit une addition de deux composantes égales : la brillance passe de 1 à 2, pas d'effet sensible.

Soit une addition de composantes très différentes : 100 et 1 par exemple : pour la première, le niveau de brillance passe de 100 à 101, ne causant aucune perturbation; pour la seconde, le passage de 1 à 100 est important et on peut admettre une variation de l'ordre du simple au double pour un effet PURKINJE marqué : même dans ce cas, la modification du résultat final ne serait que de 1 %.

Les raisonnements précédents montrent qu'il n'y a pas d'incompatibilité entre l'existence éventuelle du phénomène de PURKINJE dans les conditions de travail et une vérification précise de la loi d'additivité.

En conclusion :

« La loi d'additivité est valable en photométrie de papillotement pour de petits champs de mesure assurant une vision fovéale. »

seront suffisants dans la majorité des cas pour avoir une idée exacte de la vision colorée d'un observateur et savoir la confiance qu'on peut attribuer à ses mesures.

## § I. — PRINCIPE DE LA DETERMINATION.

Le principe est le suivant : déterminer le rapport des facteurs de visibilité d'une même longueur d'onde pour deux observateurs. Les longueurs d'onde utilisées sont :



dans l'extrémité bleue du spectre la raie 4358 Å, dans l'extrémité rouge le fond continu de 6400 à 7000 Å et dans le milieu les raies verte 5461 Å et jaunes 5770 et 5791 Å. Pour le jaune et le rouge la comparaison pourrait se faire directement, mais pour le bleu l'expérience a montré que pour la majorité des observateurs, l'égalisation est très difficile à réaliser. Toutefois, on peut tourner cette difficulté en remarquant que l'addition au bleu d'une couleur même en faible quantité (égale par exemple, ce qui ne modifie pas la couleur de manière appréciable, vu la valeur élevée du pouvoir colorant du bleu) facilite énormément l'égalisation. Pour uniformiser le mécanisme de ces mesures, ce flux additionnel a été conservé également pour le jaune et le rouge.

Le montage utilisé est celui qui a servi pour étudier la loi d'additivité (fig. 39). La lampe-tare et le circuit 1 sont munis d'un filtre vert, le circuit 2 recevant successivement les filtres bleu, jaune et rouge.

Soient  $\Phi_G$ ,  $\Phi_B$ ,  $\Phi_Y$ ,  $\Phi_R$ , les valeurs énergétiques des flux vert, bleu, jaune ou rouge provenant des circuits 1 ou 2 et arrivant sur l'écran. Soit  $\Phi_0$  un flux vert provenant de la tare en position telle que  $\Phi_G = \Phi_0$ .

Cette position de la tare est indépendante de l'observateur, la comparaison étant rigoureusement homochrome. Soient  $V_G$ ,  $V_B$ ,  $V_Y$  et  $V_R$ , les facteurs de visibilité relative d'un observateur.

#### SUCCESION DES OPÉRATIONS.

L'observateur en expérience réalise les équilibres suivants :

$$1^\circ \quad \Phi_G V_G = \Phi_0 V_G \quad \text{d'où} \quad \Phi_G = \Phi_0$$

$$2^\circ \quad \Phi_B V_B + \Phi_G V_G = \Phi_0 V_G (1 + b)$$

$$\text{d'où} : \frac{\Phi_B V_B}{\Phi_0 V_G} = b$$

3° de même pour le jaune :

$$\frac{\Phi_Y V_Y}{\Phi_0 V_G} = y$$

4° de même pour le rouge :

$$\frac{\Phi_R V_R}{\Phi_0 V_G} = r$$

Les quantités  $b$ ,  $y$  et  $r$  se déduisent immédiatement des lectures des positions de la tare : les trois constantes telles que  $\Phi_B/\Phi_0$  peuvent être éliminées en comparant ces résultats à ceux d'un observateur-type dont les mesures seront affectées de l'indice zéro. Pour l'observateur n° 1 on obtiendra des expressions telles que la suivante :

$$\frac{\left(\frac{\Phi_B V_B}{\Phi_0 V_G}\right)_1}{\left(\frac{\Phi_B V_B}{\Phi_0 V_G}\right)_0} = \frac{b_1}{b_0} = \frac{V_{B1}}{V_{B0}} \cdot \frac{V_{G1}}{V_{G0}}$$

Ces résultats permettent déjà de classer les observateurs. Mais on peut faire mieux en remarquant que la lumière verte qui sert de tare, de longueur d'onde 5461 Å, est très voisine de celle qui a le facteur de visibilité maximum. La valeur « normale » de  $V_G$  adoptée par la C.I.E. est : 0,984. Les variations autour d'un maximum étant lentes, on peut admettre que  $V_G$  est pratiquement égal à l'unité pour tous les observateurs, ce qui entraînera des erreurs au plus égales à quelques pour cent. Sous cette réserve, les expressions se simplifient :

$$\frac{b_1}{b_0} = \frac{V_{B1}}{V_{B0}} \quad \frac{y_1}{y_0} = \frac{V_{Y1}}{V_{Y0}} \quad \frac{r_1}{r_0} = \frac{V_{R1}}{V_{R0}}$$

et donnent directement le rapport, pour deux observateurs, de leur facteur de visibilité pour une même radiation.

Amené à ce point, le problème peut se traiter de deux manières différentes :

1° L'observateur-type connaît sa courbe de visibilité relative, c'est-à-dire  $V_{B0}$ ,  $V_{Y0}$ ,  $V_{R0}$  et  $V_{G0}$  : ceci permet de déterminer les constantes :

$$\frac{\Phi_B}{\Phi_0} = b_0 \frac{V_{G0}}{V_{B0}}, \dots \text{etc.}$$

d'où :

$$\frac{V_{B1}}{V_{G1}} = \frac{b_1}{b_0} \frac{V_{B0}}{V_{G0}}, \dots \text{etc.}$$

2° L'observateur-type ne connaît pas sa courbe de visibilité relative. On peut reprendre les mêmes calculs que précédemment en attribuant aux facteurs de visibilité-types des valeurs arbitraires : 1.000 par exemple pour simplifier. Si l'on dispose d'un nombre suffisant d'observateurs, on peut faire disparaître l'arbitraire du choix de cet observateur-type quelconque. Les valeurs de  $V_B$  se répartissent entre certaines limites et admettent une moyenne : celle-ci sera prise égale à la valeur « normale » de la C.I.E., les autres valeurs vraies s'en déduiront par un simple rapport. De cette manière l'observateur-type choisi initialement comme repère, rentre dans le rang à l'égal des autres. De même pour  $V_Y$  et  $V_R$ .

#### § 2. — RESULTATS.

Ces diverses mesures ont été effectuées par une cinquantaine d'observateurs et leurs résultats rapportés à l'un d'entre eux. Puis les moyennes furent calculées. A ce sujet, il est rassurant de constater que les moyennes obtenues avec dix observateurs sont pratiquement identiques à celles obtenues avec cinquante.

La représentation graphique des résultats n'aurait pas été aisée si l'on avait représenté réellement la courbe de visibilité C.I.E. pour la moyenne et les courbes qui s'en déduisent pour les divers observateurs. Il a paru préférable de situer chaque observateur par rapport à une droite horizontale d'ordonnée 1 représentant la moyenne, en portant en ordonnée pour chaque longueur d'onde les rapports  $\rho_\lambda = V_{\lambda x}/V_{\lambda m}$  du coefficient visibilité de l'observateur  $x$  pour la radiation  $\lambda$  au même coefficient relatif à l'observateur moyen.

Par définition toutes les courbes passeront par le point  $\lambda = 5461 \text{ Å}$  et  $V_{Gx}/V_{Gm} = 1$ .

Les courbes obtenues (fig. 42) se groupent en plusieurs classes assez nettement définies :

- voisines de l'horizontale;
- à pente ascendante;
- à pente descendante;
- à concavité tournée vers le haut;
- à concavité tournée vers le bas.

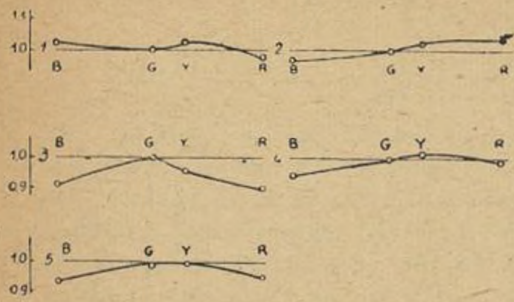
Ces aspects géométriques correspondent à diverses modifications de la courbe de visibilité chez les observateurs correspondants :

- c'est la classe des observateurs normaux;
- cette forme de courbe correspond à une translation de la courbe de visibilité vers le rouge;
- à l'inverse de la précédente, il y a ici translation vers le bleu;
- cet aspect indique une extension du domaine des radiations visibles vers les deux extrémités;
- à l'inverse de la précédente, cette courbe indique une contraction du domaine de visibilité. Il va sans dire que cette classification ne fait pas intervenir d'observateurs « anormaux », ceux-ci ayant été systématiquement mis à part. Les écarts par rapport à la moyenne sont notables, particulièrement aux extrémités du spectre et principalement dans le bleu. On peut calculer l'écart moyen en valeur absolue pour chaque radiation : le calcul donne les nombres suivants :

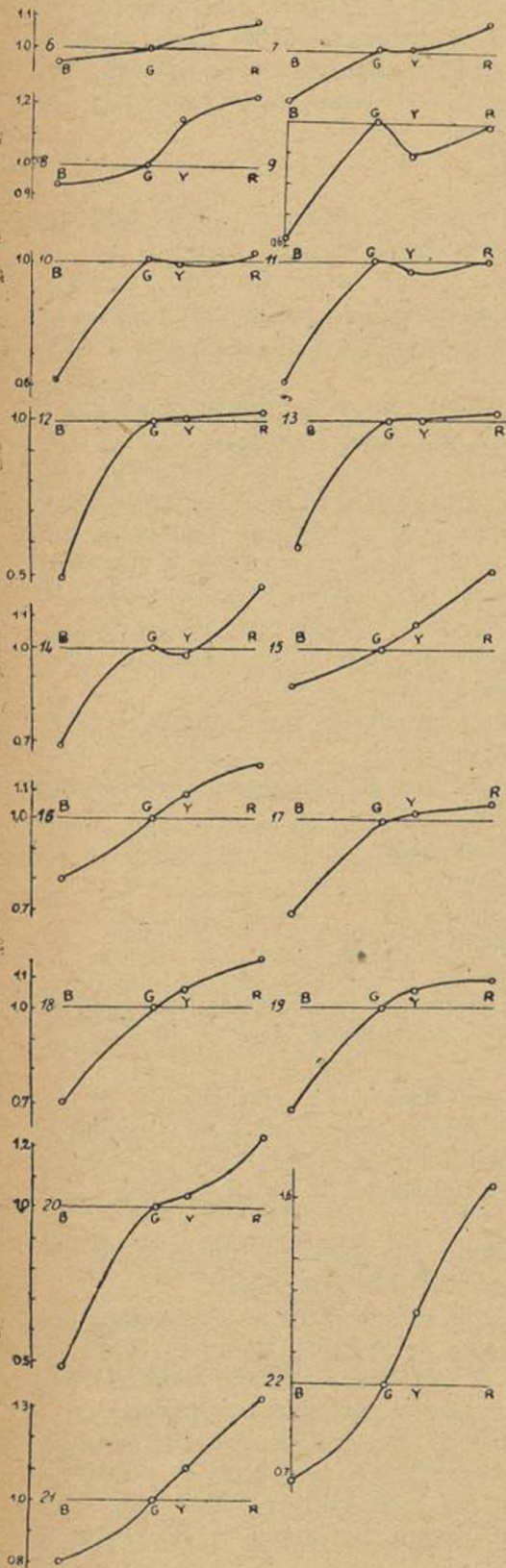
Radiation	B	G	Y	R
	0,32	0,00	0,05	0,17



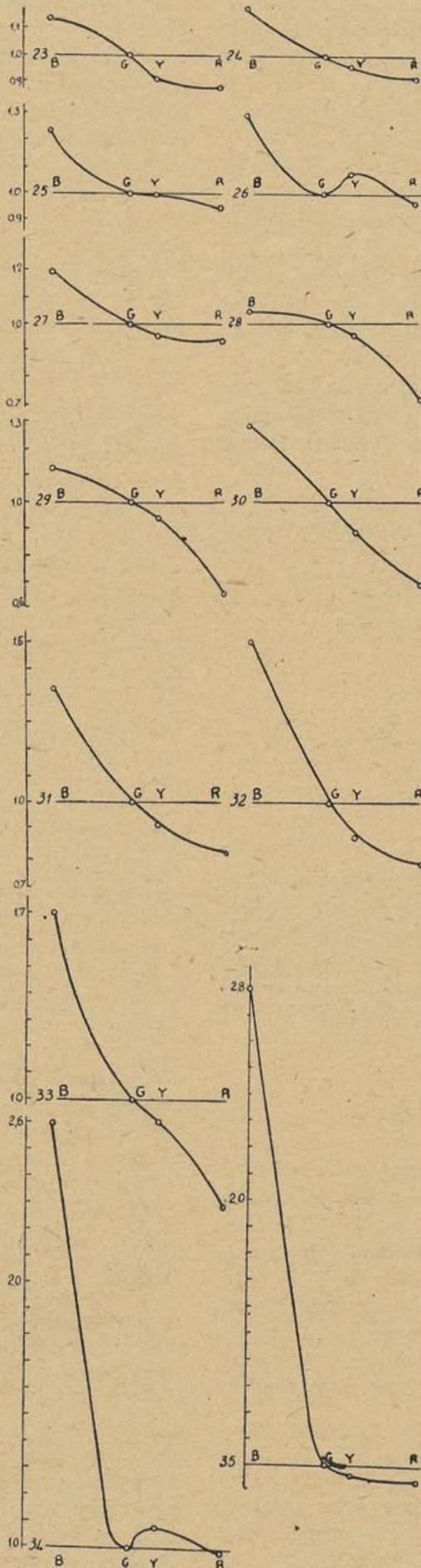
Classe a



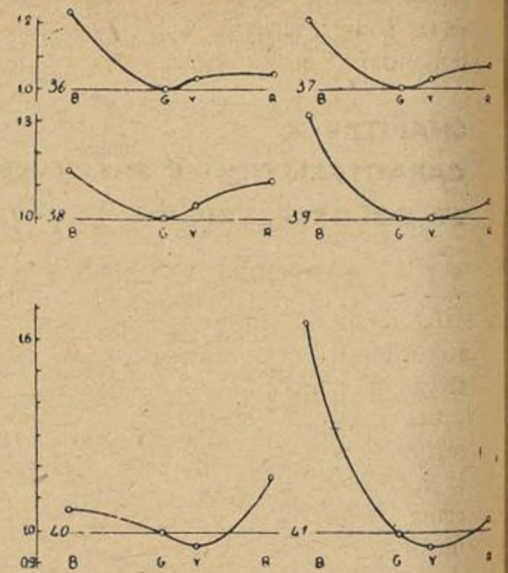
Classe b



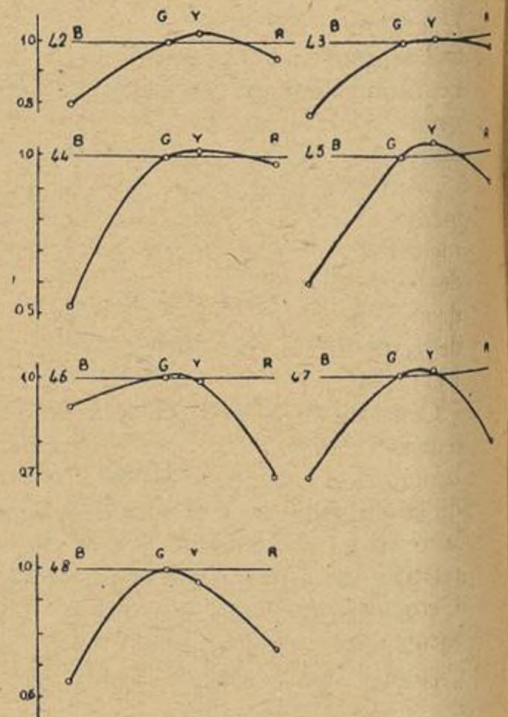
Classe c



Classe d



Classe e



REPERTOIRE DES OBSERVATEURS

- |                   |                     |
|-------------------|---------------------|
| 1 - Duvernoy.     | 25 - Cheyssé.       |
| 2 - Mme Baudin.   | 26 - Travers.       |
| 3 - Mlle Talbot.  | 27 - David.         |
| 4 - Mlle Gautier. | 28 - Cassagnol.     |
| 5 - Didier.       | 29 - Renault.       |
| 6 - Fallot.       | 30 - Rocher.        |
| 7 - Liang.        | 31 - Gouzil.        |
| 8 - Mlle Vacroux. | 32 - Mlle Dreyfus.  |
| 9 - Mme Blet.     | 33 - Kellershohn.   |
| 10 - Guichard.    | 34 - Haas.          |
| 11 - Brisard.     | 35 - Stroh.         |
| 12 - Manternach.  | 36 - Mlle Geoffroy. |
| 13 - Gillod.      | 37 - Aubert.        |
| 14 - Borne.       | 38 - Pape.          |
| 15 - Haller.      | 39 - Guillardenc.   |
| 16 - Boulanger.   | 40 - Fleury.        |
| 17 - Mlle Buquet. | 41 - Garrett.       |
| 18 - Le Gall.     | 42 - Béghin.        |
| 19 - Blet.        | 43 - Guingand.      |
| 20 - Vulmière.    | 44 - Mlle Sterlé.   |
| 21 - Demari.      | 45 - Debure.        |
| 22 - Boutry.      | 46 - Mlle Grumberg. |
| 23 - Durupt.      | 47 - Lepeuve.       |
| 24 - Moulinet.    | 48 - Lenoir.        |

Fig. 42



On peut chercher à caractériser un observateur par ses écarts comparés aux écarts moyens ci-dessus : il faut alors se fixer des limites. L'examen des courbes conduit à classer comme « normaux » des observateurs dont *tous les écarts* sont inférieurs à la *moitié* des écarts moyens correspondants, et comme « anormaux » ceux dont *au moins*

un écart est supérieur au double de l'écart moyen correspondant. La grande majorité des observateurs présente des écarts intermédiaires entre  $\epsilon/2$  et  $2\epsilon$ , ce qui met en évidence la diversité de l'œil et les écarts que l'on peut trouver entre deux observateurs dits « moyens ».

## CHAPITRE X

### CARACTÉRISTIQUES PHOTOMÉTRIQUES ET COLORIMÉTRIQUES DES OBSERVATEURS

#### § 1. — RAPPORTS $Y/B$ ET $R/B$ .

La méthode employée par Ives [25f] pour essayer de raccorder les résultats d'un observateur avec ceux de l'observateur type, est la suivante :

Les écarts de la courbe de visibilité étant importants surtout aux extrémités du spectre, Ives propose de faire la correction pour chaque moitié du spectre, ces moitiés étant définies par la courbe de transmission de deux filtres convenablement choisis placés devant une source de lumière déterminée. La source est une lampe à filament de carbone consommant 4 watts par bougie, dont la température est  $2.077^\circ \text{K}$ . Les filtres sont des cuves de 10 mm d'épaisseur contenant, l'une une solution de 72 grammes par litre de bichromate de potassium, l'autre une solution de 57 grammes par litre de sulfate de cuivre. Les concentrations ont été choisies de telle sorte que pour l'observateur-type, le rapport des brillances de la source vue à travers chaque filtre soit égal à l'unité. La correction s'effectue ainsi : divers observateurs dont on a mesuré le rapport  $Y/B$  font une même comparaison hétérochrome, la répartition de leurs résultats en fonction de leur valeur de  $Y/B$  se représente assez bien par une droite. On admet comme valeur-type de la mesure le point de cette droite correspondant à la valeur  $Y/B = 1,000$  [43] [44].

Cette méthode présente plusieurs difficultés de mise en œuvre relatives, l'une à la définition du régime de la lampe, l'autre à l'emploi de filtres liquides. Une variation de la température de la lampe entraîne un déplacement de la courbe de rayonnement, ce qui modifie la répartition relative des brillances dans les deux moitiés du spectre. L'emploi des filtres liquides présente plusieurs inconvénients : les solutions, même en cuve étanche, s'évaporent

L'emploi de filtres en verre et de radiations monochromatiques élimineront beaucoup de ces causes d'erreur. Il était donc tout indiqué de comparer les rapports  $R/B$  déterminés d'après les résultats du chapitre précédent aux rapports  $Y/B$  des mêmes observateurs. Le nombre de ceux pour lesquels les deux mesures ont pu être faites est malheureusement restreint, neuf seulement. On peut représenter sur un graphique chaque observateur par un point ayant pour abscisse le rapport  $R/B$  et pour ordonnée le rapport  $Y/B$ . Ces points se situent très convenablement le long d'une droite. Celle de la figure 43 a été tracée par la méthode des moindres carrés : elle passe par le centre de gravité des points. Celui-ci correspond à une valeur de  $Y/B$  égale à 0,96. La classification des observateurs rapportée à cette moyenne concorde bien avec celle du paragraphe précédent. Il est donc permis de suspecter la mise en œuvre de la méthode  $Y/B$  (réglage du pyromètre, état d'évaporation des solutions) et logique de modifier les valeurs du rapport  $Y/B$  en les divisant par 0,96.

Le fait que les points se situent sur une droite montre que la détermination du rapport  $R/B$  peut rendre les mêmes services pour la caractérisation des observateurs, que celle du rapport  $Y/B$  de Ives.

De ce qui précède on peut déduire que les mesures de comparaison peuvent être faites sur une lumière monochromatique au lieu de porter sur tout le spectre. Les solutions de Ives [19a] ont en effet un facteur de transmission qui varie de manière continue d'une extrémité à l'autre du spectre, partageant en gros celui-ci en deux régions l'une bleue l'autre orange. Le rapport  $R/B$  au contraire provient de mesures faites sur une bande homochrome de 6.200 à 7.000 Å et sur la raie bleue de 4.358 Å du mercure. Les observateurs se groupent de la même manière pour les deux méthodes, ce qui tend à prouver que d'une façon générale les courbes de visibilité varient d'une manière continue.

#### § 2. — ESSAI DE COLORIMÉTRIE.

Le photomètre papilloteur ayant fait ses preuves en photométrie hétérochrome doit se prêter à certaines mesures colorimétriques. A titre d'essai, et pour ne pas compliquer le montage, on a fait choix d'une couleur à deux composantes. On sait que, pratiquement, toutes les couleurs comprises entre le vert et le rouge peuvent être égalées à un mélange de ces deux primaires, sans qu'il y ait à faire intervenir le bleu, troisième composante de la théorie trichromatique.

Soit par exemple la radiation jaune du mercure, il est possible de déterminer deux flux, l'un vert et l'autre rouge dont la résultante soit identique en couleur et en intensité au flux jaune. Le montage utilisé est celui qui a servi pour l'étude de la loi d'additivité. Les deux flux additionnels des circuits 1 et 2 sont respectivement vert et rouge, le flux de la lampe-tare (circuit 3) étant jaune. Le plateau mobile du photomètre est bloqué de telle sorte que le champ soit coupé en deux : l'appareil fonc-

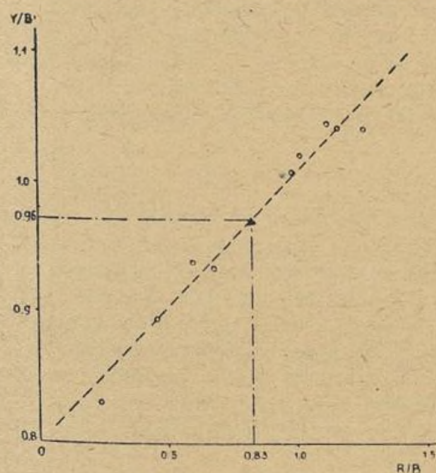


Fig. 43

assez rapidement, ce qui modifie la concentration donc le facteur de transmission; les variations de température ont aussi leur importance quoique plus faible, une variation de 10 degrés modifiant de 1 % la valeur de  $Y/B$ .



tionne alors en photomètre à contraste ordinaire. Les deux flux vert et rouge peuvent être réglés en intensités au moyen de diaphragmes à iris convenablement placés (chapitre V, § 9).

En déplaçant simultanément la lampe-tare, on arrive à obtenir deux plages de même couleur et de même intensité. De même que précédemment (chapitre VII) il faut prendre garde à l'accoutumance de l'œil.

On peut ensuite mesurer par papillotement les valeurs relatives des flux vert et rouge, par rapport à la lampe-tare jaune. Le choix de cette tare jaune ne sert que pour l'équilibrage colorimétrique et n'influe en rien sur la valeur

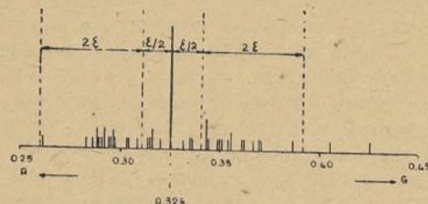


Fig. 44

du rapport  $F_G/F_R$  mesuré par la suite. La moyenne des diverses valeurs de  $F_G/F$  obtenues par un même observateur permet de situer dans le triangle des couleurs le point représentatif de la radiation jaune du mercure.

Malgré le manque de finesse de la ligne de séparation (nettement moins bonne que dans un cube de LUMMER) les diverses mesures effectuées par un même observateur sont bien groupées à quelques pour cent près autour d'une valeur moyenne, et cela même à des mois d'intervalle, ce qui implique une assez grande constance des caractéristiques colorimétriques d'un œil déterminé.

## CONCLUSION

Sans reprendre en détail tous les résultats obtenus au cours de cette étude, il est intéressant de souligner ici les plus importants d'entre eux.

En ce qui concerne la lampe à vapeur de mercure, type de la lampe à décharge moderne, des recherches théoriques et expérimentales menées de front ont permis de préciser les conditions à réaliser pour stabiliser le flux lumineux : accessoirement il a pu être établi que dans la lampe étudiée le gaz d'électrons se comportait comme un gaz parfait dont la température cinétique atteindrait dans l'axe 35.000 KELVIN.

La méthode de papillotement donne une solution pratique des problèmes posés par la photométrie hétérochrome. L'utilisation d'un champ de 1,4 et de brillances voisines de 400 δ stilbs permet de réduire à des valeurs non gênantes l'effet PURKINJE et l'effet de tache jaune. Moyennant quelques hypothèses simples sur le mécanisme subjectif du papillotement, les résultats fournis par cette méthode peuvent être raccordés à ceux obtenus par comparaison directe, dans les cas où celle-ci donne des résultats cohérents.

Enfin l'étude de quelques caractéristiques photométriques et colorimétriques d'une cinquantaine d'observateurs a montré la très grande diversité des yeux humains. Il est évidemment possible de déterminer pour chaque caractéristique

Des rapports  $F_G/F_R$  des flux lumineux composants, on déduit le rapport  $G/R$  des flux composants chromatiques correspondants, en écrivant :

$$R = F_R \quad G = \frac{F_G}{4,59} \quad \text{soit} \quad \frac{G}{R} = \frac{F_G}{F_R} \times \frac{1}{4,59}$$

1/4,59 étant le rapport des luminosités des composants verte et rouge du blanc (à spectre d'égale énergie), pour l'observateur moyen; pour chaque observateur, ce facteur est un peu différent, ce qui devrait conduire à corriger la valeur  $G/R$  indiquée ci-dessus.

N'ayant pas les éléments de cette correction, on a reporté sur la figure 44 les valeurs de  $\frac{G}{R+G}$  correspondant à 47 observateurs.

Les valeurs 0 et 1 correspondent respectivement au rouge et au vert.

Cette représentation peut donner une idée de la dispersion des coordonnées colorimétriques de l'œil humain

dans cette région. La valeur moyenne est  $\frac{G}{R+G} = 0,326$

et l'écart moyen  $\epsilon = 0,031$ .

Il est intéressant de constater que cette dispersion ne suit pas une loi de GAUSS et que, en particulier, il n'y a pas accumulation de valeurs autour de la valeur moyenne. En pratique cela signifie qu'il y a très peu d'observateurs dont les caractéristiques soient très voisines des caractéristiques standard définies par des moyennes.

Ces résultats montrent la très grande diversité de l'œil humain, aussi bien en colorimétrie qu'en photométrie hétérochrome.

Caractéristique une valeur moyenne relative à l'ensemble des observateurs étudiés. La particularité à signaler est que les diverses valeurs expérimentales ne sont pas plus denses au voisinage de la moyenne. En d'autres termes, il y a relativement peu d'observateurs voisins de la normale. Les caractéristiques standard adoptées ne doivent pas être considérées comme des valeurs plus fréquentes; il y a donc peu de chances de trouver un observateur standard, surtout si l'on envisage simultanément plusieurs caractères de la vision colorée. En résumé, les données standard n'ont qu'une valeur statistique et il serait vain de chercher à les déterminer avec une grande précision.

G. BLET,

Ce travail a été effectué au Conservatoire National des Arts et Métiers sous la direction de M. P. FLEURY, que je suis heureux de remercier ici pour les conseils qu'il m'a prodigués et la sollicitude qu'il m'a témoignée. Je remercie également M. G.-A. BOUTRY, grâce à qui le nouveau photomètre papilloteur a pu être réalisé au Laboratoire d'Essais. Je tiens enfin à assurer de ma gratitude tous ceux qui très amicalement n'ont pas ménagé leur peine pour me faciliter la tâche que je m'étais assignée.

G. B.



# RÉFÉRENCES

- [1] ABADY. — Voir [42].
- [2] W. ABNEY. — Colour photometry 11. *Phil. Trans. Royal Soc.*, p. 423, 1885.
- [3] F. ALLEN. — Effect upon the persistence of vision of exposing the eye to light of various wave-lengths. *Phys. Review* 11, p. 257, 1900.
- [4] W. BECHSTEIN. — Ein neues Flimmerphotometer. *Instr. Kunde* 25, p. 45, 1905.
- [5] L. BLOCH. — Ionisation et résonance des gaz et vapeurs. *Presses Universitaires*, Paris 1925.
- [6] G.-A. BOUTRY. — Phénomènes photoélectriques : 4, p. 17, 1936; 6, p. 10, 1936.
- [7] F.-E. CADY. — Voir [24].
- [8] P.-W. COBB. — The influence of illumination of the eye on visual acuity. *Am. J. of Physiology* 29, p. 76, 1911.
- [9] W.-W. COBLENTZ. — The physical photometer in theory and practice. *J. of Frank. Inst.* 180, p. 335, 1915.
- [10] COHU. — Voir [13].
- [11] CRITTENDEN, RICHTMYER. — An « Average Eye » for heterochromatic photometry and a comparison of a flicker and an equality of brightness photometry. *Bull. Bur. Stds.* 14, p. 87, 1917; *Trans. Ill. Eng. Soc.* 11, p. 331, 1916.
- [12] CUSTERS J.-F.-H. — Fotoelektrische intensiteitsmetingen in het kwik spectrum. Imprimé chez : G.-J. Willemse, Utrecht, 1931.
- [13] DARMOIS, COHU. — Lampes à incandescence et lampes à décharge. *Mémorial des Sciences Physiques* : 45, pp. 51-80. — 1941.
- [14] DORGELD. — Circuits électriques à courants alternatifs pour lampes à décharge. *Revue technique Philips* 103, 1937.
- [15a] DRESSLER. — Über den Einfluss von Farbton und Sättigung auf die Messung verschiedenfarbiger Lichter. *Das Licht*, p. 203, 1937.
- [15b] DRESSLER. — Beitrag zur Photometrie farbiger Lichtquellen, insbesondere zur Frage des Verlaufs der spektralen Hellempfindlichkeit. *Das Licht*, pp. 81-107, 1937.
- [16a] ELENBAAS. — Die Temperatur des Quecksilberbogens. *Physica* 1, p. 211, janvier 1934.
- [16b] ELENBAAS. — Die Quecksilber-hochdruckentladung. *Physica* 1, p. 673, juin 1934.
- [16c] ELENBAAS. — Die Intensitätsverteilung und die gesamtstrahlung der Super-hochdruck-Quecksilberentladung. *Physica* 3, p. 859, août 1936.
- [16d] ELENBAAS. — A new method of determining the temperature of a high-pressure discharge. *Physica* 9, p. 53, janvier 1942.
- [17] FEDEROV, FEDEROVA. — *C. R. Académie des Sciences U.R.S.S.* 9, p. 95, 1936.
- [18a] W.-E. FORSYTHE, BARNES, SHIRDER. — Photometry of colored Light Sources. *J.O.S.A.* 28, p. 241, juillet 1938.
- [18b] W.-E. FORSYTHE. — Voir [24].
- [19a] GIBSON. — Spectral characteristics of Test solutions used in heterochromatic photometry. *J. Opt. Soc. Am.* 9, p. 113, 1924.
- [19b] GIBSON, TYNDALL. — Visibility of Radiant Energy. *Bull. Bur. of Stds.* 19, p. 131, 1923; *Scientific Papers* 475.
- [20] GROTRIAN. — Graphische Darstellung der Spektren von Atomen und Ionen mit ein, zwei und drei Valenzelektronen. *Berlin* 1928.
- [21a] J. GUILD. — A new flicker photometer for heterochromatic photometry. *J. of Sci. Instr.* 1, p. 182, 1924.
- [21b] J. GUILD. — The Guild flicker photometer head. *J. of Sci. Instr.* 12, p. 169, 1935.
- [22] A.-N. HESEHOUS. — Modification du photomètre de Bunsen. *Journal de Physique* 8, p. 539, 1889; *Journal de la Société Russe de Physique et de Chimie* 24, p. 165, 1892; 29, p. 118, 1897.
- [23] HIECKE. — Über neue Beziehungen zwischen Farbenempfindung und Helligkeit. *Zeit. für Sinnesphysiologie* 59, p. 67, 1928.
- [24] E.-P. HYDE, W.-E. FORSYTHE, F.-E. CADY. — The visibility of radiation. *Astro. J.* 48, p. 65, 1918.
- [25a] H.-E. IVES. — A variable absorption screen for photometric use. *Elec. World* 59, p. 598, 1912.
- [25b] H.-E. IVES, KINGSBURY. — The theory of the flicker photometry. *Phil. Mag.* 28, p. 708, 1914; 31, p. 290, 1916.
- [25c] H.-E. IVES. — A visual acuity test object. *Elec. World* 55, p. 939, 1910.
- [25d] H.-E. IVES. — Studies in the photometry of lights of different colors. *Phil. Mag.* 24, pp. 149, 352, 744, 843, 853, 1912.
- [25e] H.-E. IVES. — The establishment of photometry on a physical basis. *Trans. Ill. Eng. Soc.* 10, p. 315, 1915.
- [25f] H.-E. IVES. — The photometric scale. *J. of Frank. Inst.* 188, p. 217, 1919.
- [26] J. KERN. — Eine flüssigkeitsgekühlte Quecksilberlampe hoher Leuchtdichte. *Zeit. für techn. Phys.* 4, p. 108, 1942.
- [27a] E.-F. KINGSBURY. — A flicker photometer-attachment for the Lummer-Brodhun contrast photometer. *J. of Frank. Inst.* 2, p. 215, 1915.
- [27b] E.-F. KINGSBURY. — Voir [25b].
- [28] KREFFT. — Strahlungseigenschaften der Entladung in Quecksilberdampf. *Techn. Wiss. Abh. Osram-Konz.* 4, p. 33, 1936.
- [29] KRÜSS. — Das Problem der Flimmerphotometrie. *Phys. Zeit.* 5, p. 65, 1904. — Zur Flimmerphotometrie. *Instr. Kunde*, 24, p. 250, 1904; 25, p. 98, 1905.
- [30] M. LAPORTE. — Décharge électrique dans les gaz. *Armand Colin* 216, Paris 1939.
- [31a] M. LUCKIESH. — On the growth and decay of color sensations in flicker photometry. *Phys. Review* 4, p. 1, 1914.
- [31b] M. LUCKIESH. — Monochromatic light and visual acuity. *Elec. World* 58, p. 450, 1911.
- [31c] M. LUCKIESH. — The dependence of visual acuity on the wave-length of light. *Elec. World* 58, p. 1252, 1911.
- [31d] M. LUCKIESH. — Visual acuity in white light. *Elec. World* 62, p. 1160, 1913.
- [31e] M. LUCKIESH. — The Purkinje effect and a comparison of flicker and direct-comparison photometer. *Elec. World* 55, p. 939, 1910.
- [32] R. MANNKOPFF. — Zie ook voor den Koolboog. *Zeit. für Phys.* 76, p. 396, 1932; 86, p. 161, 1933.
- [33] MARTENS. — *Instr. Kunde*, février 1905.
- [34] PIATTI. — Nuovo dispositivo per il confronto dei metodi fotometrica dello scintillio e dell'uguale chiarezza. *Il nuovo cimento* 7, p. 117, 1930. — Ein auf innerer Diffusion beruhendes Flimmerphotometer. *Zeit. für Phys.* 72, p. 803, 1931.
- [35a] H. PIÉRON. — Traité d'ophtalmologie.
- [35b] H. PIÉRON. — Recherches sur la validité de la loi d'Abney. *Année psychologique*, 1939.
- [36] M. PIRANI. — Nouvelles recherches sur la production de la lumière. *Congrès international d'électricité*, 6<sup>e</sup> Section, Rapport n° 5. Paris, 1932.
- [37a] PRIEST, RILEY. — The selective reflectance of magnesium oxyde. *J. Opt. Soc. Am.* 20, p. 156, 1930.
- [37b] PRIEST. — Note on the yellowness of commercial magnesium carbonate and the alleged yellowness of magnesium oxyde. *J. Opt. Soc. Am.* 20, p. 157, 1930.
- [38] PURKINJE. — Zur Physiologie des Sinne 2, p. 109, 1823.
- [39] RICHTMYER. — Voir [11].
- [40] RILEY. — Voir [37].
- [41a] O.-N. ROOD. — *Phys. Review* 3, p. 241, 1893.
- [41b] O.-N. ROOD. — On a Photometric Method which is independent of Color. *Am. J. of Sciences* 46, p. 173, 1893. — On the Flicker Photometer. *Am. J. of Sciences* 8, p. 194, 1899.
- [41c] O.-N. ROOD. — Über das Flimmer-Photometer. *Phys. Zeit.* 1, p. 269, 1900.
- [42] SIMMANCE, ABADY. — The Simmance-Abady Flicker photometer. *Proc. Royal Soc. of London* 19, p. 37, 1904; *Phil. Mag.* 7, p. 341, 1904.
- [43] STILES. — Yellow-blue ratio an personal errors in heterochromatic photometry. *Phil. Mag.* 17, p. 600, 1934.
- [44] A.-H. TAYLOR. — The validity of flicker photometer measurements in heterochromatic photometry. *J. Opt. Soc. Am.* 2, p. 193, 1926; 13, p. 193, 1926.
- [45] J.-S. TOWNSEND. — Electricity in gases. *Clarendon Press*, Oxford, 1915.
- [46a] L.-T. TROLAND. — The influence of brightness and color upon flicker-photometer frequency. *J. of Frank. Inst.* 181, p. 853, 1916; 182, p. 261, 1916.
- [46b] L.-T. TROLAND. — The absence of the Purkinje phenomenon in the fovea. *J. of Frank. Inst.* 182, p. 111, 1916.
- [47] TUFTS. — *Journal de l'Académie des Sciences de New-York* 16, p. 190, 1897.
- [48] TYNDALL. — Voir [19b].
- [49] W. UYTERHOEVEN. — Variations périodiques du flux lumineux des lampes à décharge électrique (effet de papillotage). *Natuurkundig Laboratorium der N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken*, Eindhoven, Holland, 1938.
- [50] K.-S. WEAVER. — The visibility of radiation at low intensities. *J. Opt. Soc. Am.* 27, p. 36, 1937.
- [51] WEIGEL. — Zur Photometrie farbiger Lichter. *Das Licht*, p. 43, 1935.
- [52] WHITMAN. — On the photometry of differently colored lights and the « flicker » photometer. *Phys. Review* 3, p. 241, 1896.



