

## 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](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	<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>
<b>LISTE DES VOLUMES</b>	
	<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>
<b>VOLUME TÉLÉCHARGÉ</b>	
	<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>
	<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°39 (1938)</a>
Adresse	Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 1938
Collation	1 vol. (VIII p.) : ill. ; 32 cm
Nombre de vues	12
Cote	CNAM-BIB P 1329-B (15)
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-B.15">https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B.15</a>

## **Note de présentation du ....**

---

...

P1329-B

8. Kustof. (16)

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
LABORATOIRE D'ESSAIS



NOS RÉCENTS PROGRÈS  
DANS L'ART DE PRODUIRE  
ET DE MESURER LA LUMIÈRE

par G. A. Boutry

PUBLICATION N° 39

(Extrait de « La Technique  
Moderne » 15 Décembre 1938)



*Supplément à la livraison de La Technique Moderne du 15 Décembre 1938.*

**LES CONFÉRENCES DE « LA TECHNIQUE MODERNE »**

53<sup>e</sup> CONFÉRENCE :

**NOS RÉCENTS PROGRÈS DANS L'ART DE PRODUIRE  
ET DE MESURER LA LUMIÈRE**



*Conférence faite le mercredi 9 novembre 1938, sous la présidence de*

**M. A. COTTON,**

*Membre de l'Institut,*

PAR

**M. G.-A. BOUTRY,**

*Docteur ès Sciences, Directeur du Laboratoire d'Essais du Conservatoire national des Arts et Métiers.*

**PREMIÈRE ALLOCUTION DE M. COTTON**

*M. A. Boutry va nous parler des récents progrès dans l'art de produire et de mesurer la lumière. Voilà un sujet qui intéresse tout le monde. Plus un pays est civilisé, plus il s'efforce d'améliorer ces sources de lumière artificielle qui, dans les ateliers, facilitent le travail des ouvriers et augmentent leur rendement et qui contribuent tant au confort de nos habitations.*

*Chaque jour, on devient à cet égard plus exigeant. Au siècle de Louis XIV, les fêtes de Versailles étaient illuminées par des chandelles; il y avait même un personnel chargé de les moucher. Or si, d'après les indications que l'on trouve dans les Mémoires, on cherche à estimer l'éclairage dans ces salles, on trouve qu'elles nous paraîtront aujourd'hui horriblement sombres et tristes.*

*Ces progrès incessants ont été bien plus rapides lorsqu'on a pu faire des mesures photométriques. Les deux parties de la conférence de M. Boutry, la production de la lumière et sa mesure, sont étroitement liées entre elles, et il était naturel de les associer. Vous le savez tous, on ne peut vraiment perfectionner un procédé technique que si l'on peut mesurer — et même mesurer avec précision — les grandeurs qui interviennent.*

*La Technique Moderne a eu bien raison de demander à M. Boutry de vous entretenir de ces deux sujets. Docteur ès Sciences, M. Boutry avait précisément choisi comme sujet de thèse ces cellules photo-électriques qui interviennent de plus en plus souvent dans les mesures photométriques, ces cellules qu'il a perfectionnées lui-même encore par la suite et dont il dira quelques mots plus loin. D'autre part, M. Boutry est, depuis plusieurs années, Directeur du Laboratoire d'Essais du Conservatoire des Arts et Métiers : il a complètement transformé et rajeuni ce laboratoire, qui, sous son impulsion, a pris une activité remarquable. J'ai eu l'occasion d'y faire une visite, d'admirer entre autres installations le remarquable banc photométrique qui s'y trouvait. J'ai été frappé de voir combien ce laboratoire, où l'on cherche à perfectionner sans cesse les méthodes mêmes d'essais et de contrôle, est utile à la science elle-même, tout en répondant admirablement à son but.*

**CONFÉRENCE DE M. BOUTRY**

*La Technique Moderne, en m'invitant à faire cet exposé, a rendu, je le crains, à son public, un fort mauvais service. Les hommes qui passent leur vie dans un laboratoire ne considèrent le sujet de recherches le plus passionnant qu'en termes de nombres et de dimensions. Il faudra donc m'excuser si, traitant l'un des plus beaux sujets qui soient, je reste désespérément terre à terre, et si l'art de tirer du feu cette énergie visible sans laquelle il n'y aurait chez l'homme ni arts picturaux, ni arts plastiques, se réduit ici à des catalogues de chiffres.*

*Il n'est rien de si difficile à mesurer que la lumière, il n'est rien de si délicat à engendrer et à maintenir. Ces deux constatations dérivent d'ailleurs l'une de l'autre : si nous savions bien mesurer les propriétés de nos sources lumineuses, nous pourrions les améliorer plus vite. Mais l'œil humain, le plus*

parfait, le plus sensible de nos instruments, a coutume de commettre des erreurs grossières quand on lui demande des appréciations quantitatives. Pourtant, il a, par définition, toujours raison ; chaque fois qu'il induit l'expérimentateur en erreur, c'est qu'il a été mal utilisé, appelé à juger dans des conditions inhabituelles, et que les résultats qu'il a fournis ont été utilisés dans des circonstances très éloignées de celles où on les a obtenus.

**Le rendement visuel.**

*Avant d'aller plus loin, il faut remarquer que certaines données caractéristiques des sources de lumière sont à la rigueur susceptibles d'une définition et d'une mesure dans lesquelles l'œil n'intervient pas, ou n'intervient que pour fixer des limites. Autre chose est d'utiliser de telles données. Prenons un exemple :*

on peut définir le *rendement énergétique* d'une source; cette grandeur procède d'une idée familière à tout ingénieur : c'est le quotient de l'énergie utilisable produite par la source par l'énergie qu'il faut dépenser pour la maintenir en fonctionnement stable. Par énergie utilisable, il faut entendre ici l'énergie rayonnée dans le domaine visible, c'est-à-dire grossièrement entre les longueurs d'onde  $0,4 \mu$  et  $0,8 \mu$ . La lumière paraît d'autant moins chère que ce rendement est plus élevé. La vérité est, hélas ! moins simple, et, pour juger de l'*efficacité* et du *rendement visuels* d'une source, il faut tenir un compte bien plus complet des propriétés de l'œil humain : des quantités égales d'énergie rayonnées sous forme de flux monochromatiques de longueurs d'onde diverses ne lui paraissent en rien équivalentes, et cette constatation fondamentale, si simple dans l'expression que je viens de lui donner, est déjà d'une complexité extrême, car elle procède d'un mélange difficile à séparer de deux sensations : intensité et couleur. Essayons de préciser.

Considérons un objet fait de *blanc* et de *noir* : je veux dire que rien n'y est sélectif, que ses propriétés absorbantes ou réfléchissantes sont les mêmes pour toutes les radiations visibles

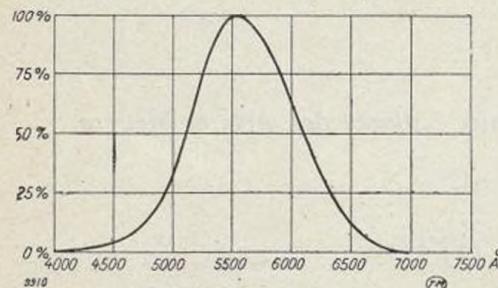


FIG. 1. — Sensibilité chromatique de l'œil humain normal (convention provisoire de 1924).

cette page imprimée en envoyant sur chaque décimètre carré de sa surface  $3/10\,000$ e de watt d'énergie lumineuse monochromatique de longueur d'onde  $0,55 \mu$ , et l'immense majorité des observateurs déclarera pouvoir lire sans peine les caractères. Mais, si la même expérience est faite avec une quantité égale d'énergie rayonnante de longueur d'onde  $0,76 \mu$  (rouge sang) ou  $0,38 \mu$  (extrême violet), tous seront d'accord pour déclarer inacceptables les conditions dans lesquelles vous leur demandez de déchiffrer. Cette simple expérience suffit à prouver que la sensation lumineuse n'est pas fonction de la seule variable *quantité d'énergie*, mais aussi de la *longueur d'onde* caractéristique de cette énergie. En d'autres termes, il n'y a pas égalité entre la grandeur que j'appellerai *flux lumineux reçu par l'œil* et celle que nous nommions tout à l'heure la puissance rayonnée par la source. Le rapport de ces deux grandeurs est une fonction de la longueur d'onde (fig. 1). Si je donne arbitrairement au maximum, qui a lieu vers  $0,55 \mu$ , la valeur 1, le coefficient de visibilité du bleu moyen ( $0,48 \mu$ ) et de l'orangé ( $0,645 \mu$ ) n'est déjà que 0,14 environ, et celui des deux radiations que nous choisissons tout à l'heure 0,00004 : les nombres parlent d'eux-mêmes, et nous voyons à quel point la notion simpliste du rendement énergétique tel que je le définissais tout à l'heure présente peu d'intérêt. Il faut lui substituer le rendement visuel, que l'on déduira du premier en affectant chaque énergie élémentaire rayonnée dans chaque longueur d'onde d'un poids qui n'est autre que le coefficient de visibilité de la radiation considérée : le rendement visuel est donc toujours plus petit que le rendement énergétique ; il ne pourrait lui être égal que pour une source monochromatique qui rayonnerait uniquement de l'énergie de longueur d'onde  $0,55 \mu$ , la longueur d'onde de meilleure visibilité.

Ainsi, avant même d'avoir pu décrire les propriétés d'une seule de nos sources lumineuses, j'ai dû faire intervenir une qualité de l'œil dont chacun sait ou devine que sa mesure est un des problèmes les plus ardu斯 que la nature ait posé au physicien. Supposons-le résolu : sa solution va nous permettre d'étudier le rendement de nos luminaires.

### Sources incandescentes.

Newton a écrit son *Optique* à la lumière d'une chandelle. Bouguer, l'inventeur de la photométrie, possédait des lampes à huile déjà fort régulières. Regnault a vu Paris éclairé au gaz, par les becs papillons qui illuminent encore, le 14 juillet, la façade de l'École des Mines et de la Chambre des Notaires. Une Exposition Universelle célèbre a consacré simultanément la Paix et l'éclairage électrique. Dans toutes les sources que je viens de citer, la lumière est obtenue par *incandescence*; elle procède d'un solide chauffé à température suffisante : le carbone, dans la flamme de la bougie, de l'acétylène, de la lampe à huile et la lampe à pétrole; le manchon Auer, dans la flamme du gaz; le carbone encore, ou un métal peu fusible, dans la lampe électrique à incandescence... Les lois de la thermodynamique imposent des limites immuables aux propriétés de ces sources : aucune ne saurait rayonner plus, à température égale, que le *corps noir*, et celui-ci, régi par la loi de Stephan qui veut son rayonnement proportionnel à la quatrième puissance de la température absolue, a un rendement purement énergétique toujours mauvais; *a fortiori*, le rendement lumineux est pire (fig. 2).

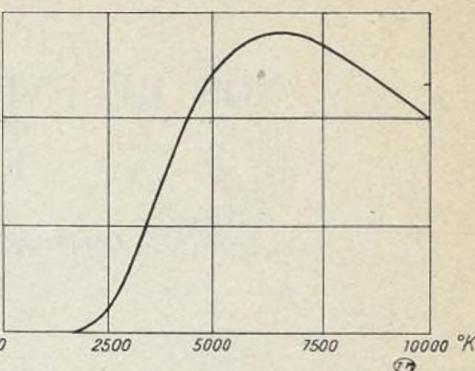


FIG. 2. — Rendement lumineux théorique du corps noir, en fonction de la température absolue.

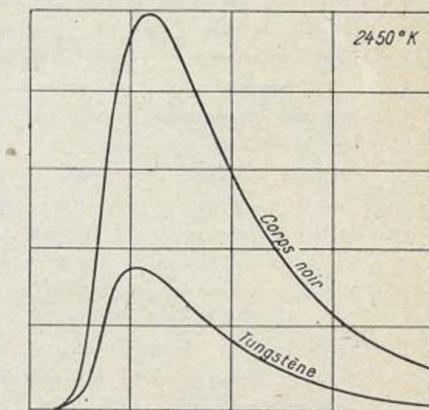


FIG. 3. — Émissions du corps noir et du tungstène, chauffés à la même température.

Celles que nous avons réalisées par nos faibles moyens, pas assez chaudes, ont quelquefois, toutes choses égales d'ailleurs, un rendement visuel un peu supérieur à celui du corps noir porté à la même température. La figure 3 explique pourquoi :

le maximum d'émission d'un métal chauffé est toujours déplacé du côté des courtes longueurs d'onde par rapport à celui du corps noir porté à la même température, de sorte que, jusqu'à  $5\,000^{\circ}\text{K}$  au moins, l'énergie qu'ils émettent a une valeur visuelle meilleure que celle qui provient du corps noir chauffé dans les mêmes conditions.

Plus caractéristique encore est le cas des oxydes métalliques, et en particulier du mélange de thorine et de cérite qui a fait la gloire de Rubens et d'Auer de Welsbach : comme le montre la figure 4, ce mélange a une émission très sélective et ne fournit à peu-près rien dans le proche infra-rouge, en sorte que son rendement lumineux est bien supérieur à celui du corps noir chauffé à la même température. Longtemps, le manchon Auer

est resté la plus économique de toutes les sources incandescentes, avec un rendement lumineux que les lampes électriques ont, depuis, dépassé, parce que l'énergie qu'on leur fournit est bien mieux utilisée.

Il résulte de tout cela que l'amélioration de l'éclairage par incandescence revient, au point de vue physique, à l'obtention de températures de plus en plus élevées. Le meilleur exemple que l'on en puisse donner se trouve dans l'histoire du développement de la lampe électrique à incandescence : lampe d'Edison à filament de platine; lampe à filament de carbone (celle de l'Exposition Universelle de 1881); lampe à filament de tantal ou de tungstène dans le vide (1913); la même, où un filament plus ramassé et la présence d'une atmosphère peu conductrice d'argon et d'azote, qui a pour rôle principal de ralentir l'évaporation du tungstène, a permis d'atteindre une température plus élevée; enfin, la même encore, remplie d'une atmosphère de krypton et d'azote, mélange moins conducteur, qui permet de faire l'ampoule plus petite et de chauffer plus encore le filament; celle-ci date de 1932. Des noms restent attachés à ces diverses étapes : Edison, Langmuir, enfin Georges et André Claude.

Le tableau I illustre par quelques chiffres ce que je viens de résumer; dans ce tableau, les températures indiquées ne sont pas les températures vraies, que nous n'avons souvent aucun moyen de mesurer; ce sont les températures qu'il faudrait donner à un corps noir pour que la composition spectrale de son rayonnement visible soit aussi rapprochée que possible de celle que donne la lampe étudiée. Nous l'appellerons température de couleur équivalente. Notion critiquable, notion peu précise, qui n'a de sens

FIG. 4. — Corps noir et manchon Auer. Le spectre visible est encadré par deux ordonnées tracées en trait plein (voir détail A).

TABLEAU I. — CARACTÉRISTIQUES DES SOURCES INCANDESCENTES

	TEMPÉRATURE degrés absolus	RENDEMENT visuel pour cent
Combustions....	Bougie .....	1 930
	Gaz (bec papillon).....	2 160
	Lampe à pétrole.....	2 050
	Lampe à acétylène.....	2 460
Manchon Auer :	Basse pression .....	0,03
	Haute pression .....	0,035
Lampes électriques à incandescence.	A filament de carbone.....	0,04
	A filament de tungstène dans le vide .....	0,11
	Dans l'argon.....	0,19
	Dans le krypton.....	0,31
Soleil (sans l'absorption atmosphérique).....	(temp. vraie)	(temp. vraie)

que pour les sources non sélectives — le manchon Auer ne l'admet évidemment pas —, mais préférable à l'ignorance.

### Brillance d'une source.

Température de couleur et rendement d'une source incandescente vont de pair. Une autre qualité, la *brillance* de la source considérée, varie comme eux. Cette grandeur se définit à partir du flux lumineux rayonné par la source et des dimensions linéaires de celle-ci. Le quotient  $\frac{d\varphi}{d\omega}$  du flux rayonné par une source dans une direction donnée par l'angle solide de rayonnement définit l'intensité lumineuse  $S$  de la source. Sa brillance est le quotient de cette intensité par la surface apparente de la source pour la direction considérée. Nous sommes tous d'accord qu'il est désirable que nos sources lumineuses aient de bons rendements. Est-il désirable que leur brillance soit grande? Tant que l'on s'est éclairé avec des sources nues, on s'accordait à penser que non : les sources très brillantes fatiguent et éblouissent l'œil. Je sors un peu de mon sujet, pourtant bien vaste, en notant que, de nos jours, les sources lumineuses artificielles sont toujours entourées de larges enveloppes de verre opalin ou diffusant qui suppriment cet inconvénient, sans faire baisser exagérément le rendement de l'ensemble par leur absorption, qui reste faible. Par ailleurs, les sources de grande brillance que nous possédons maintenant sont précieuses chaque fois que l'on doit résoudre le problème simple et essentiel qui consiste à faire entrer dans un trou de dimensions données le plus de lumière possible (cas des projecteurs, des lanternes de projection, de l'éclairage des microscopes, des spectrographes, etc...). L'examen des divers cas possibles montre toujours que nous n'avons que deux variables sur lesquelles il soit possible d'agir (fig. 5) : l'ouverture, c'est-à-dire l'angle solide de rayonnement  $\Omega$ , et la brillance de la source utilisée; quand on tente d'augmenter la première, on est rapidement limité par la difficulté rencontrée dans la correction des aberrations engendrées par les systèmes optiques (lentilles, miroirs, etc...) qui suivent. L'obtention de grandes brillances est donc, en pratique, le meilleur moyen que nous ayons d'augmenter la portée de nos phares ou de rendre commode l'emploi d'objectifs de microscope puissants, mais de faible clarté. Voici ce qu'ont permis d'obtenir les sources incandescentes dont je viens d'indiquer les rendements :

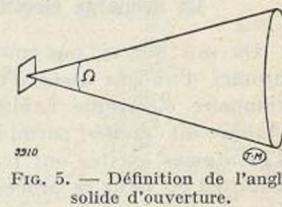


FIG. 5. — Définition de l'angle solide d'ouverture.

	BRILLANCE bougies/cm <sup>2</sup>
Gaz (bec papillon) .....	4
Lampe à pétrole .....	14
Acétylène .....	70
Manchon Auer.....	48 à 67
Lampe à filament de carbone .....	65
Lampe à filament de tungstène (vide) .....	164
Lampe à filament de tungstène (argon) .....	300
Arc à charbon simple .....	13 000
Arc à haute densité de courant .....	80 000
Soleil .....	170 000

Dans cette liste, on a fait place à l'arc électrique, peu utilisé dans l'éclairage proprement dit; en dehors de cette source incommodante, on voit combien faibles sont les brillances de nos sources par rapport à celle du soleil. L'image fournie par un objectif de microscope est 500 fois plus brillante quand on forme sur l'objet, pour l'éclairer, l'image du soleil que lorsqu'on utilise la meilleure lampe demi-watt. Cela paraîtra surprenant à bien des usagers du microscope, car l'œil montre une étonnante adaptation aux éclairages les plus variés, et une parfaite inaptitude à comparer leurs grandeurs. Quand à la mémoire visuelle, si celle des formes est admirable de précision et de durée, si celle des dimensions est encore excellente, celle des éclairages est pratiquement inexisteante.

En somme, on est en droit de dire que, dans les sources incandescentes que nous avons réalisées jusqu'ici, la lumière n'est qu'un sous-produit, les produits principaux étant le rayonnement infra-rouge et même, dans les sources fonctionnant par combustion, la chaleur directement fournie au milieu environnant par conduction et convection. Tant que nous ne pourrons dépasser des températures de l'ordre de 3 000°, il en sera ainsi de toutes les sources utilisant le rayonnement par incandescence des « corps gris », c'est-à-dire des espèces chimiques réelles qui rayonnent approximativement comme le corps noir théorique. Mais l'exemple du manchon Auer montre qu'il existe des corps capables d'émettre par incandescence un rayonnement très sélectif, et presque exempt d'infra-rouge; beaucoup d'oxydes métalliques, l'oxyde d'yttrium, la zircone, la magnésie, la chaux, beaucoup de silicates métalliques aussi sont dans ce cas. Leurs propriétés, il faut le dire, sont encore bien mal connues : le manque de cohésion, de résistance mécanique de ces substances ont découragé les chercheurs. Pourtant, si l'on parvenait à chauffer électriquement, dans le vide, les bâtonnets d'oxydes métalliques de la lampe Nernst, il paraît certain que l'on réalisera des sources incandescentes bien plus efficaces que toutes celles que nous possédons actuellement. Ce n'est pas dans cette direction que les recherches les plus récentes ont avancé, et les sources dont je vais parler maintenant n'utilisent point les propriétés des solides incandescents, mais bien celles des gaz monoatomiques excités.

#### La décharge électrique en atmosphère gazeuse.

On sait que si, par un moyen quelconque, on fournit aux atomes d'un gaz assez d'énergie pour modifier leur état stationnaire électrique habituel, on obtient divers états métastables, dits *excités*, parmi lesquels se range l'état ionisé simple. Les atomes excités ont tendance à revenir à leur état stable habituel et, dans ce processus, ils restituent l'énergie absorbée lors de l'excitation; cette énergie est le plus souvent libérée sous forme de radiations visibles, de radiations monochromatiques, dont la fréquence  $\nu$  est d'autant plus grande que l'atome a perdu plus d'énergie en changeant d'état; on a en effet :

$$w_1 - w_2 = \hbar\nu \quad (1)$$

C'est la formule de Planck, la traduction algébrique de l'idée que l'énergie interne d'une particule (molécule ou atome) ne peut varier que par bonds successifs, d'amplitude finie et définie; à chacun de ces bonds correspond une déformation de l'atome ou de la molécule excité. On croit savoir, dans les cas les plus simples, en quoi elle consiste : l'unique électron de valence de l'atome d'hydrogène, par exemple, saute, quand l'atome absorbe une quantité d'énergie donnée, de l'orbite qu'il décrit à une orbite de rayon plus grand, et ce processus peut se répéter jusqu'à ce que l'électron quitte complètement la zone d'attraction du noyau atomique : c'est l'iōnisation. La vie moyenne de tous ces états métastables est courte, de l'ordre de  $10^{-8}$  sec; dans l'exemple que nous avons pris, cela veut dire que, si rien n'intervient, l'électron redescend très rapidement « l'escalier énergétique » qu'on lui avait fait gravir en émettant la ou les radiations monochromatiques définies par l'équation (1). Le nombre des radiations possibles est en relation directe avec le nombre des niveaux d'énergie possibles pour l'atome : la prévision d'un spectre rayonné par un gaz monoatomique devient ainsi une sorte d'arithmétique particulière, dont on connaît les succès.

Il y a bien des façons de fournir de l'énergie à un atome gazeux. Le simple chauffage suffit, et le vieux brûleur Bunsen, dont la flamme, après avoir léché un morceau de chlorate de soude, émet d'une façon intense le spectre de l'atome de sodium neutre, en est une preuve. Mais les modes électriques d'excitation sont bien plus commodes et bien plus employés : dans ce cas, l'excitation est toujours produite par le choc, sur les

atomes du gaz, des électrons ou des ions accélérés par le champ électrique que l'on maintient dans le tube utilisé, soit à l'aide d'électrodes, soit par induction haute fréquence. Les états d'excitation que l'on peut obtenir ainsi sont infiniment variés. En utilisant une cathode capable d'une émission thermionique intense, on obtient un régime d'arc, caractérisé par des spectres ne comprenant qu'un nombre de raies relativement restreint, correspondant à des niveaux d'énergie peu nombreux et bas : le champ électrique en régime d'arc est toujours faible; partant, les vitesses électroniques restent petites, et chaque collision fait intervenir une quantité d'énergie relativement faible. Dans les régimes d'étincelle, au contraire, on maintient dans le tube des champs très élevés et on obtient des spectres beaucoup plus riches en raies visibles et ultra-violettes.

L'étude thermodynamique du rayonnement de ces sources est encore impossible. Alors que nous sommes relativement bien renseignés sur le mécanisme de production de la lumière qu'elles émettent, nous ne savons que très peu de chose des lois suivies par leur rendement. On doit retenir pourtant que le rendement et la brillance ne croissent pas toujours ensemble, comme c'était le cas pour les sources incandescentes. J'en donnerai tout à l'heure un exemple. Il faut savoir aussi que les gaz excités ne sont pas transparents pour la plupart des radiations qu'ils émettent et que, conformément à la loi de Kirchoff, leur pouvoir absorbant pour ces radiations peut être énorme : il en résulte que le rendement d'un tube à décharge tend généralement à décroître lorsque l'épaisseur traversée par la décharge électrique devient trop forte; la lumière émise par les couches internes est absorbée avant de parvenir à l'œil. Non seulement cela n'est pas économique en ce qui concerne le fonctionnement de la lampe, mais encore cette absorption d'énergie aboutit parfois à des échauffements très grands qui diminuent la vie moyenne de la source.

En dehors de ces deux faits, il n'a pas été possible d'énoncer des lois permettant de prévoir les conditions les meilleures pour le fonctionnement d'un tube à gaz déterminé. C'est que les variables principales — qui sont ici la densité de courant, la pression du gaz, sa température, la section du tube, l'influence des parois — sont bien loin d'être indépendantes : en faisant varier l'une, on influe sur les autres, et bien souvent sans s'en rendre compte. C'est aussi que, dans ce domaine, les mesures précises deviennent d'une extrême difficulté; nous allons le voir dans quelques instants.

#### Applications : sources modernes de lumière colorée.

Dès ce que je viens de dire, on serait en droit de déduire que le spectre d'un gaz monoatomique excité est toujours formé de raies strictement monochromatiques; il n'en est rien. Plus la pression du gaz et sa température sont élevées, plus on s'écarte de cette règle, et plus les raies émises sont larges et à contour peu net; aux très hautes pressions, un fond continu peut même apparaître. Le même fond continu peut se manifester lorsqu'on utilise des excitations très intenses. Tous ces phénomènes, théoriquement secondaires, ont un intérêt pratique capital. Préfions des exemples :

La vapeur de mercure, l'hélium, le néon et leur famille, la vapeur de sodium, sont aujourd'hui les gaz les plus utilisés dans les tubes à décharge. L'arc à vapeur de mercure, dont on trouve dans les œuvres de M. Fabry l'une des toutes premières descriptions, eut d'abord la forme de la lampe Coopér Hewitt : tube large, pression très faible (quelques millimètres de mercure), température à peine supérieure à la température ambiante. Un peu plus tard, on construit la lampe en silice fondu, et on lui fait supporter un régime un peu plus poussé. Il y a quelques années que l'on a commencé des essais d'éclairage de routes avec des lampes où la pression de régime est de l'ordre de 1 atm et la température de régime beaucoup plus élevée. Enfin sont apparus coup sur coup les deux derniers types, dans lesquels le diamètre du tube à décharge est extrêmement

réduit (de l'ordre du millimètre) et la pression de régime très forte (30 à 200 atm). La vapeur de mercure, dans ces lampes, est loin d'être à basse température. Autant que l'on puisse s'en rendre compte, la « température » régnant au centre de la colonne lumineuse de la lampe « 1 atm » est de l'ordre de 7 000° K (elle décroît d'ailleurs rapidement quand on s'écarte de l'axe du tube); dans les lampes à pression plus forte, l'échauffement axial est plus grand encore; cela explique la nécessité de refroidir par circulation d'eau les tubes de grande puissance. Avec des régimes si dissemblables, on conçoit que la composition de la lumière rayonnée par ces diverses sources soit très

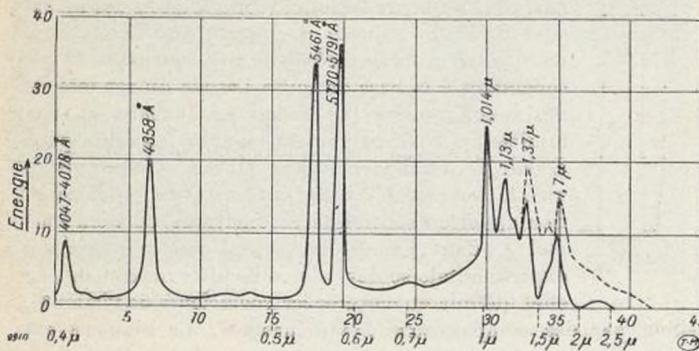


FIG. 6. — Lampe « 20 atm ».

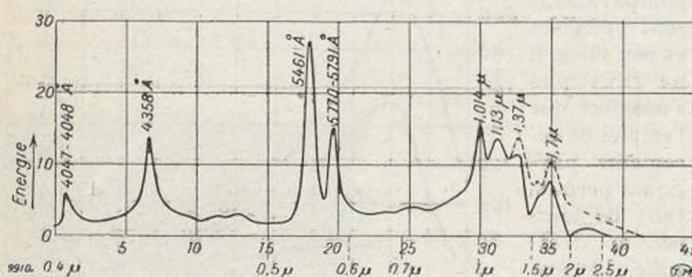


FIG. 7. — Lampe « 130 atm ».

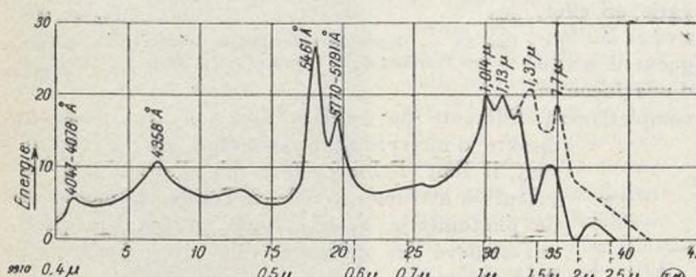


FIG. 8. — Lampe « 200 atm ».

FIG. 6 à 8. — Enregistrements spectrophotométriques montrant le développement du fond continu dans le spectre de lampe à vapeur de mercure, lorsque la pression de fonctionnement augmente.

variable. Les enregistrements spectrophotométriques (fig. 6 à 8) montrent que, au fur et à mesure que la pression augmente, un fond continu apparaît dans le spectre, et finit par représenter plus de 50 % de l'énergie totale rayonnée.

Je citerai, pour second exemple, ce que M. Laporte a pu tirer du tube au xénon, en excitant ce dernier gaz par des décharges intermittentes très condensées; le résultat atteint est mis en évidence par les figures 9 et 10, qui représentent l'enregistrement microphotométrique de la lumière fournie par le tube au xénon et de celle qui émane du cratère d'un arc au charbon fonctionnant vers 3 800° K : la composition des deux rayonnements est sensiblement analogue.

Les tubes au néon, que M. Georges Claudé construisait dès 1911, sont trop connus pour que je les décrive longuement. Il suffira de dire qu'ils existent aujourd'hui sous deux formes :

les uns fonctionnent en « régime d'étincelle » avec des électrodes froides; les autres, munis d'électrodes fournissant une émission thermo-ionique intense, admettent des densités de courant voisines du régime d'arc.

Enfin, on construit des tubes dans lesquels c'est la vapeur de sodium qui rayonne; elle ne fournit pratiquement dans le spectre visible que le doublet jaune D<sub>1</sub>D<sub>2</sub>, dont on connaît les applications dans l'éclairage des routes (1).

Cette dernière lampe a peut-être été étudiée un peu mieux que les autres au point de vue de l'influence de la température et de la densité de courant sur le rendement. On a pu constater ainsi que, pour chaque intensité de courant, il existe une température donnant un rendement maximum (fig. 11). Le rendement le meilleur possible d'une telle lampe a pu être prévu et mesuré; il correspond à des régimes peu poussés, c'est-à-dire à de faibles densités de courant; il est excellent, de l'ordre de 50 % : dans une telle source, la lumière cesse enfin d'être un sous-produit. Les lampes au sodium, dans la pratique, sont d'ailleurs loin d'atteindre une telle perfection.

TABLEAU II. — CARACTÉRISTIQUES DE QUELQUES LAMPES À DÉCHARGE

	BRILLANCE bougies/cm <sup>2</sup>	RENDEMENT pour cent
Lampes à mercure :		
Basse pression, ampoule de verre .....	23	3,6
Basse pression, ampoule de quartz .....	150	6,7
Pression de 1 atm .....	1 500	8
Haute pression (20 atm) .....	5 000	
— (75 atm) .....	33 000	9
— (120 atm) .....	90 000	10
Lampe au sodium .....		10 à 20
Lampe au néon .....		(10-12)

On remarquera que c'est la première fois que je caractérise une de ces sources par un nombre. Le tableau II en indique quelques autres, que je n'ose donner qu'en usant de précautions, et en soulignant qu'ils ne représentent guère que des ordres de grandeur.

#### Comparaison photométrique des lumières colorées.

Je dois avouer maintenant que, si l'on me demandait de justifier la manière dont ces chiffres ont été obtenus, il me serait bien difficile de le faire. J'ai pris la précaution de définir le rendement, dans tout ce qui précède, d'une manière qui ne soulève pas trop de difficultés d'ordre théorique. Mais que penser des brillances qui viennent d'être indiquées? Comment oser exprimer avec la même unité, comment comparer entre elles la brillance d'un arc au mercure, d'une lampe au sodium et d'un tube au néon? Il est temps de le reconnaître : il s'agit là de grandeurs qui ne sont pas de même nature, puisque les sources sont colorées. Dans la revue rapide que j'ai faite des sources incandescentes, j'ai pu faire abstraction de cette difficulté, parce que la composition spectrale de leur rayonnement ne variait pas beaucoup. Il devient impératif, dans l'étude des autres sources, d'introduire la notion de couleur, qui va nous entraîner, je le crains, dans d'inextricables difficultés.

Il est tout de suite évident que l'emploi de sources lumineuses colorées pose trois problèmes :

1<sup>o</sup> Comparer entre elles les intensités ou les brillances de deux sources colorées : c'est le problème de la photométrie

(1) Voir *La Technique Moderne*, t. XXV, n° 17 (1<sup>er</sup> septembre 1933), p. 569; n° 18 (15 septembre 1933), p. 609; t. XXVIII n° 4 (15 février 1936), p. 118; n° 5 (1<sup>er</sup> mars 1936), p. 160.

hétérochrome, dont Fabry a dit qu'il n'a peut-être pas de sens, mais qu'il lui faut une solution;

2<sup>o</sup> Exprimer la couleur d'une lumière en termes qui la définissent simplement, mais sans ambiguïté : c'est le problème de la colorimétrie;

3<sup>o</sup> Prévoir enfin le résultat que l'on obtiendra lors de l'emploi d'une source colorée, et en particulier prévoir la couleur

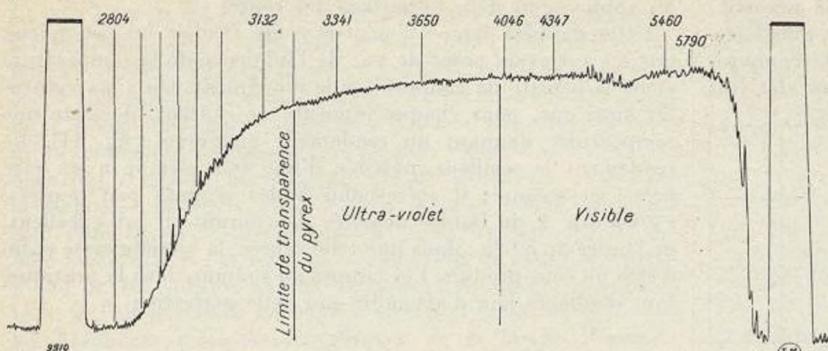


FIG. 9. — Tube au xénon en pyrex (Laporte).

que paraîtront avoir les corps sélectifs qui seront éclairés par une telle source : ce problème, qui n'est pas identique à la réunion des deux précédents, est le plus important de tous dans l'art de l'éclairage. Je vais l'illustrer d'un exemple assez vulgaire : il irait à la ruine certaine le restaurant qui, éclairé par des sources d'apparence blanche, servirait à ses clients du beurre d'aspect verdâtre ou des viandes violacées.

La solution d'aucun de ces trois problèmes n'est obtenue simplement, et les difficultés croissent dans l'ordre où je les ai énumérées. La comparaison des brillances, des éclairements, des flux lumineux dans le cas des sources homochromes est une opération relativement simple, que l'on sait maintenant effectuer avec un degré de précision souvent élevé. On m'excusera de donner comme exemple de ces perfectionnements le banc photométrique que nous avons construit il y a un an au Laboratoire d'Essais du Conservatoire des Arts et Métiers. Avec ce remarquable instrument (fig. 12), par des méthodes oculaires, la mesure d'une intensité lumineuse se fait à 5 ou 6 % près. Il n'est d'ailleurs pas aisément d'atteindre cette précision, et, pour y réussir, il est essentiel de placer l'opérateur dans des conditions telles que l'œil ne puisse être ni

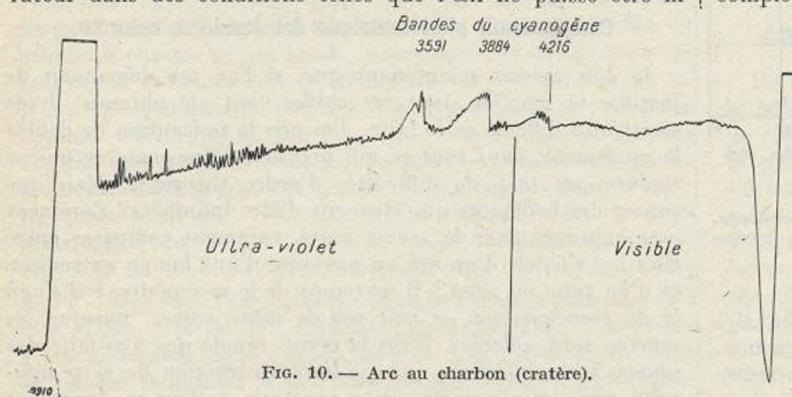


FIG. 10. — Arc au charbon (cratère).

fatigué ni ébloui; dans ces mesures, l'équation personnelle joue un rôle non négligeable.

C'est à cause de cela, c'est pour faire mieux, que l'on a recours à des récepteurs physiques, au premier plan desquels il faut placer les cellules photo-émissives (<sup>1</sup>). De tels récepteurs, bien construits, sont moins sensibles, mais plus réguliers et plus fidèles que l'œil, et à peu près infatigables. Vous savez peut-

être déjà que nous avons passé plusieurs années à mettre au point, au Laboratoire d'Essais, des cellules photo-émissives d'un type spécial, où un anneau de garde et une disposition convenable des électrodes font disparaître la plupart des défauts des cellules commerciales actuelles. La figure 13 montre leur aspect. Utilisées avec un instrument de mesure des courants convenable, de telles cellules permettent d'atteindre une précision et une fidélité de 1 % dans les mesures homochromes.

Abordons les mesures hétérochromes : tout change. Le premier des trois problèmes dont je donnais tout à l'heure l'énoncé (comparaison des intensités de deux sources de couleurs différentes) se montre très difficile à résoudre pratiquement. Il est cependant à la base de toute l'étude du rendement des sources, même de celles qui fournissent une lumière approximativement blanche. En effet, pour définir le rendement visuel d'une source quelle qu'elle soit, nous avons fait intervenir une fonction appelée « sensibilité chromatique de l'œil normal », dont j'ai dit au début que la définition expérimentale soulève des difficultés : comment, en effet, définir et mesurer les coefficients de visibilité,

sinon par des comparaisons hétérochromes ? Le moment est

venu d'avouer

Flux

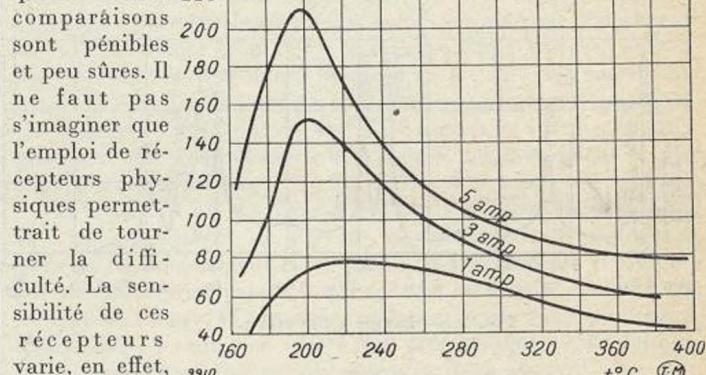


FIG. 11. — Rendement des lampes à vapeur de sodium, en fonction de la température et de la pression.

d'une façon si complètement différente de celle de l'œil que, pour être en mesure d'interpréter les résultats qu'ils fournissent, il faut d'abord s'être mis d'accord sur les valeurs à attribuer à celle-ci. Toutes les méthodes de photométrie hétérochrome utilisées jusqu'ici ont soulevé des critiques ; elles appartiennent à deux groupes :

a) La comparaison photométrique directe des deux flux à l'aide des photomètres utilisés habituellement pour les mesures homochromes. Or, cette comparaison donne des résultats aberrants si les deux flux ont des couleurs très différentes. On a le choix entre deux artifices : ou bien l'une des sources est munie d'un verre coloré dont la transmission est telle que la teinte du flux sortant se rapproche de celle du flux fourni par l'autre source ; dans ce cas, la transmission du filtre, longueur

d'onde par longueur d'onde, doit être étudiée par spectrophotométrie ; ou bien on utilise des sources auxiliaires de couleurs ajustables de façon à passer par une série de pointes photométriques de la source la plus « bleue » à la source la plus « rouge », sans que le champ du photomètre montre jamais un contraste de couleur inacceptable : c'est la méthode dite des cascades.

Les deux façons de faire sont bien loin de permettre la précision que l'on obtient dans les mesures homochromes : la méthode des cascades accumule des erreurs expérimentales, celle des filtres repose sur une détermination spectrophoto-

(1) Voir *La Technique Moderne*, t. XXII, n° 4 (15 février 1930), p. 137; n° 5 (1<sup>er</sup> mars 1930), p. 179; n° 6 (15 mars 1930), p. 212.

métrique en général peu précise; de plus, elle n'est applicable qu'aux sources donnant un spectre suffisamment complexe. Il est évident que l'on chercherait en vain un filtre coloré qui

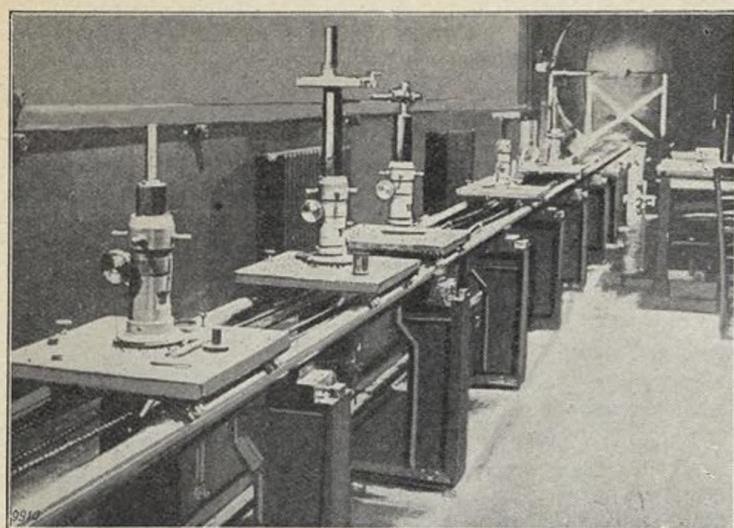


FIG. 12. — Laboratoire d'essais. Banc photométrique de 12 m et sphère d'intégration.

permette de comparer deux radiations monochromatiques, par exemple la raie jaune du sodium et la raie verte du mercure.

b) Les méthodes de papillotage : les deux flux à comparer alternent, éclairant l'un après l'autre la rétine de l'œil dans les mêmes conditions. Il en résulte, si la fréquence des alternances est correctement choisie (de l'ordre de 10 à 30 par seconde), une sensation de papillotage qui disparaît ou passe par un minimum pour un certain ajustage des flux lumineux à comparer. On convient de dire que, à ce moment, les deux flux sont égaux. On parvient, de cette manière, à une sensibilité de l'ordre de 2 %, mais il est à peine nécessaire de faire remarquer que les conditions dans lesquelles la mesure est exécutée n'ont aucun rapport avec celles dans lesquelles l'œil est appelé d'ordinaire à juger de l'intensité d'un flux.

Toutes ces méthodes paraissent un peu artificielles. C'est qu'il faut se donner beaucoup de mal pour trouver une mesure à des grandeurs de natures différentes !

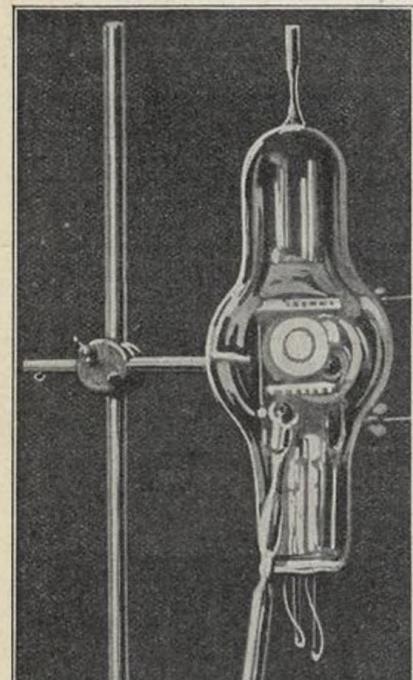


FIG. 13. — Cellule photo-émissive à anneau de garde, spécialement étudiée pour la photométrie.

commune mesure à des grandeurs de natures différentes !

#### La sensibilité chromatique de l'œil humain et ses variations.

La sensibilité chromatique de l'œil a été étudiée par tous ces moyens. On devine que les résultats sont variables avec les méthodes. Ce qui est plus grave, c'est que les variations sont bien plus grandes encore quand on change les observateurs ou les conditions de l'expérience. Je vais en donner quelques exemples :

1<sup>o</sup> La figure 14 représente les résultats obtenus en étudiant, dans les mêmes conditions expérimentales, la vue d'environ 120 observateurs « normaux » (je veux dire non daltoniens); on voit qu'elle accuse une importante dispersion des résultats;

2<sup>o</sup> La figure 15 montre les divergences obtenues en étudiant le même groupe d'observateurs par deux méthodes différentes : il y a un déplacement important dans la position du maximum de sensibilité;

3<sup>o</sup> Les deux courbes de la figure 16 se rapportent au même observateur, utilisant la même méthode ; seule la valeur de l'éclairage avait changé ; la courbe de gauche est obtenue dans un vaste registre d'éclairage (à partir de 25 lux au moins) ; pour des éclairages de plus en plus faibles, le maximum de sensibilité se déplace vers les petites longueurs d'onde :

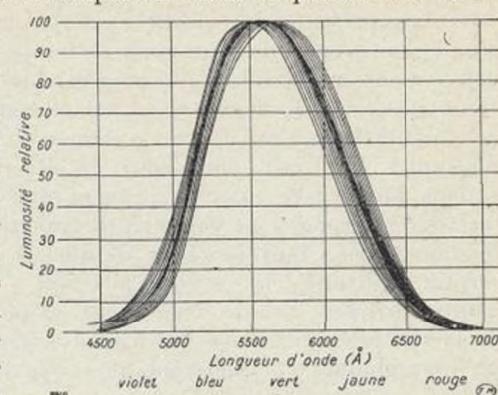


FIG. 14. — Superposition des courbes correspondant à divers observateurs normaux.

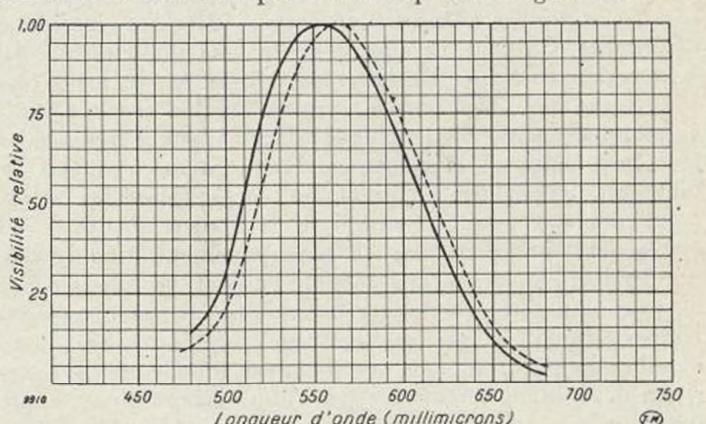


FIG. 15. — Courbes obtenues par deux méthodes différentes.

la courbe de droite a été relevée avec des éclairages de l'ordre de 0,003 lux ;

4<sup>o</sup> Ce n'est pas tout ! Tout ce qui précède résume des résultats obtenus en étudiant seulement la partie centrale de très petite superficie, la « tache jaune », de l'œil. Les zones externes de la rétine ont à peu près certainement une sensibilité chromatique différente.

C'est à partir de données aussi fuyantes que nous devons évaluer le rendement lumineux et la couleur des sources ! En ce qui concerne le rendement, il n'y a évidemment qu'une façon de s'en tirer ; on l'a reconnu et, en 1924, le Comité international de l'Éclairage a défini une courbe de sensibilité chromatique de l'œil normal, à partir de laquelle on effectue désormais des calculs de rendement (fig. 1). C'est une courbe conventionnelle, une « cote mal taillée » entre de nombreuses expériences. L'adoption d'une telle convention ne résout malheureusement pas le deuxième problème, celui qui consiste à caractériser la

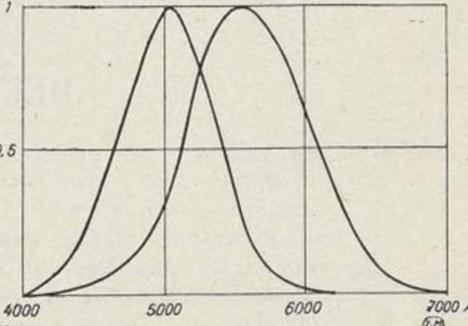


FIG. 14 à 16. — Exemples des divergences observées dans la photométrie hétérochrome.

couleur d'une source : l'adoption d'une convention fixe n'empêchera jamais que la couleur apparente d'une source ne soit variable avec sa brillance. Cela est bien dommage, mais cela est vrai; à l'Opéra-Comique, le metteur en scène de *Werther* n'hésite pas, pour imiter l'éclairage lunaire (qui est *rouge*) à mettre en marche des projecteurs munis de filtres *bleus*; il a raison, parce que toute lumière faible prend cette teinte apparente.

Il résulte de ce phénomène que la *colorimétrie* — qui est l'art de représenter la couleur d'une lumière par une notation simple qui permet de reproduire sa teinte — vit, elle aussi, de conventions, qui ne sont à peu près valables que pour des conditions spécifiées d'éclairement. Chacun connaît, au moins par ses applications, l'un de ces systèmes de conventions colorimétriques : c'est celui dans lequel on admet que toutes les sensations lumineuses colorées peuvent être reproduites par le mélange en proportions variables de trois sensations lumineuses fondamentales, dans le choix desquelles règne d'ailleurs un certain arbitraire : le « bleu », le « vert » et le « rouge ». Les peintres avaient inventé, bien avant les physiciens, le principe de la synthèse trichrome, qui a trouvé depuis les applications photographiques et typographiques que l'on sait.

#### L'avenir des sources colorées.

Un tel système colorimétrique est certainement incapable de résoudre notre dernier problème, le plus général, celui qui consiste à prévoir l'aspect d'un corps éclairé par une lumière déterminée. On peut, en effet, réaliser deux lumières qui, dans la notation trichrome, seront représentées par le même symbole — et qui, effectivement, quand on les projette sur un corps non sélectif, donnent deux plages ayant à très peu près la même teinte — mais qui conduisent à des résultats tout différents lorsqu'elles éclairent un corps fortement sélectif.

Le problème de la « synthèse de la lumière solaire », c'est-à-dire de l'obtention avec un bon rendement d'un éclairage qui dénature aussi peu que possible l'aspect des objets colorés, ne peut donc être résolu par les simples méthodes colorimétriques. Seule la *spectrophotométrie* — c'est-à-dire l'étude détaillée, longueur d'onde par longueur d'onde, de la composition de la lumière renvoyée par l'objet éclairé d'une manière déterminée — permettra, compte tenu de la sensibilité chromatique de l'œil, de résoudre un tel problème. Or, les mesures spectrophotométriques visuelles comptent, à l'heure actuelle, parmi les plus pénibles et les plus longues qui soient : mais ces mesures relatives peuvent se borner à des comparaisons

homochromes et, en conséquence, on peut utiliser pour les faire des récepteurs physiques. On est ainsi amené à construire des *spectrophotomètres enregistreurs*, qui, à vrai dire, sont encore très loin d'être parfaits, mais sur les progrès desquels il est permis de fonder les plus grands espoirs. C'est seulement lorsque ces appareils seront devenus capables d'analyser les intensités des raies fines d'un spectre complexe que l'on réussira à obtenir du problème des solutions régulières, et non des solutions de hasard.

Ce qui est d'ores et déjà certain, c'est qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser, pour fabriquer de la lumière « blanche » acceptable, des sources fournissant des spectres d'émission continus. Une preuve, connue depuis Biot et Fresnel, en est fournie par les spectres cannelés, dans lesquels manquent un très grand nombre de radiations et qui n'en donnent pas moins la sensation de « blanc » très correcte. Par contre, il ne faut pas espérer réussir, dans le cas général, en superposant quelques radiations monochromatiques isolées. C'est dommage.

Parmi les solutions moyennes qui ont été proposées, je voudrais en citer deux. L'une, ancienne, est insuffisante, mais fort élégante : c'est une application d'une expérience de Georges Claude, qui montre que, si un tube contient un mélange de néon et de vapeur de mercure, on obtient le spectre du mercure dans ses parties larges et le spectre du néon dans ses parties étroites. Naturellement, rien n'empêche, dans la pratique, d'utiliser deux tubes contigus : c'est ce que tous les Parisiens ont vu à la station « Richelieu-Drouot » du Métropolitain.

L'autre solution, qui n'est qu'à son début, consiste à utiliser des tubes dont les parois sont enduites d'une couche mince de substances luminescentes (sulfures ou oxydes métalliques) ; les spectres ainsi obtenus sont très riches, et le rendement devrait être amélioré, puisque la luminescence des solides est surtout provoquée par les rayons ultra-violets, invisibles et inutilisables autrement. L'étude spectrophotométrique rationnelle de ces tubes devrait donner un jour des résultats intéressants.

Malgré tous nos efforts, la puissance et la teinte de nos sources restent bien loin de celles du soleil, et, quant au rendement, le ver luisant, dont Langley a étudié le rayonnement au bolomètre, est, avec 97 %, un modèle d'économie dont nous sommes encore loin d'approcher. Chacun, pourtant, s'aperçoit des progrès réalisés dans les dix dernières années. Nous ferons mieux, j'espère, en mesurant mieux.

G.-A. BOUTRY.

## DEUXIÈME ALLOCUTION DE M. COTTON

*Oserai-je dire qu'il y a une assertion inexacte dans cette Conférence? C'est la phrase du début que j'incrimine, celle où l'auteur dit que, en l'invitant à faire cette conférence, La Technique Moderne risquait de rendre à son public un fort mauvais service.*

*Cet exposé, que je n'hésite pas à qualifier de lumineux — le mot est de circonstance —, donne une idée tout à fait nette de cette importante et difficile question. M. Boutry a montré bien clairement comment les mesures sur la lumière, qui donnent des résultats si sûrs lorsqu'il s'agit de radiations monochromatiques, se compliquent lorsque les spectres sont complexes, et qu'il devient nécessaire de tenir compte des propriétés de l'œil humain. Je l'en remercie et l'en félicite bien vivement.*

*Je tiens à exprimer aussi notre reconnaissance à ceux qui vous ont apporté leur concours. Je remercie particulièrement M. Georges Claude. C'est, en effet, grâce surtout à lui que la France a contribué brillamment à ces progrès récents dans l'art de produire la lumière. Il y a contribué aussi bien par ses recherches sur les lampes à incandescence que par celles qu'il a faites sur les gaz rares et sur les lampes à luminescence de gaz.*

*La lampe à incandescence paraît encore avoir un assez long avenir devant elle : c'est une source de lumière de prix modéré, que chacun peut installer et multiplier sans peine ; il faut bien tenir compte, dans le calcul du prix de l'éclairage, de l'amortissement du prix des appareils eux-mêmes.*

*Les lampes à luminescence gazeuse ont déjà, comme M. Boutry l'a bien montré, un rendement incomparablement meilleur ; leur emploi se généralisera sans doute beaucoup. La lumière qu'elles émettent — à part l'exception très remarquable constituée par le krypton — est colorée, ce qui est un inconvénient pour les besoins de l'éclairage général. Mais, comme M. Boutry l'a expliqué, M. Claude lui-même a trouvé déjà des moyens d'atténuer, dans une certaine mesure, ce défaut. Il convient de souligner particulièrement l'artifice consistant à mettre dans ces lampes des substances fluorescentes qui permettent de mettre à profit ces radiations invisibles, ou à peine visibles, qui accompagnent les raies les plus intenses, tout au moins celles qui ont des longueurs d'onde plus courtes. Il y a encore sans doute, dans ces directions, de grands progrès à faire : ce sera la tâche de l'avenir.*



