



**HAL**  
open science

## Photométrie physique

J. Thovert

► **To cite this version:**

J. Thovert. Photométrie physique. Journal de Physique et le Radium, 1930, 1 (4), pp.121-125.  
10.1051/jphysrad:0193000104012100 . jpa-00205413

**HAL Id: jpa-00205413**

**<https://hal.science/jpa-00205413>**

Submitted on 4 Feb 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## LE JOURNAL DE PHYSIQUE

ET

## LE RADIUM

## PHOTOMÉTRIE PHYSIQUE

par J. THOVERT

Professeur à la Faculté des Sciences de Lyon.

**Sommaire.** — La possibilité de mesures spectrophotométriques précises avec les cellules photoélectriques rend désirable la définition physique des qualités lumineuses. Le choix d'une fonction arbitraire de visibilité permet de définir la luminosité monochromatique et sa valeur relative, caractéristique de la couleur. Un outillage technique peut être rapidement mis au point pour effectuer les mesures objectives utilisant ces définitions.

**Définition des grandeurs lumineuses.** — La production industrielle des cellules photoélectriques permet la construction d'appareils spectrophotométriques applicables à toutes mesures concernant l'utilisation des qualités lumineuses de l'énergie rayonnée. Les opérations photométriques pourront être alors exclusivement objectives, et pour les utiliser il sera désirable d'avoir un système de définitions physiques des qualités lumineuses qu'on se propose de mesurer.

Il ne semble pas que la dernière réunion de la Commission Internationale de l'Eclairage ait apporté quelque progrès en ce domaine (<sup>1</sup>). Les Comités particulièrement désignés pour l'étude de la photométrie hétérochrome et de la colorimétrie expriment il est vrai, leur désir de trouver une solution aux difficultés des mesures dans l'utilisation des données spectrophotométriques. Mais le Comité des définitions et symboles conserve la liaison du flux lumineux à l'énergie par la formule

$$F = K E/t,$$

dans laquelle  $K$  est un coefficient global pour le rayonnement complexe ; il souhaite aussi la réalisation d'une source étalon susceptible d'être acceptée universellement.

Cette définition du flux lumineux qui n'explicite aucune intervention de la couleur inséparable des autres qualités reste ambiguë pour la comparaison des éclairagements hétérochromes et se présente contradictoire avec les solutions désirées pour les problèmes où la couleur intervient.

Les difficultés rencontrées jusqu'ici pour un accord universel sur la « bougie internationale » dépendent surtout du caractère subjectif que l'on croit devoir maintenir dans la définition du flux lumineux. Comment espérer un gain en précision dans les comparaisons d'effets visuels alors qu'on n'ignore pas la diversité inévitable des sensations individuelles et même les variations de sensation chez un individu au cours du temps. Pour obtenir un système de mesures acceptables universellement il faut le définir physiquement, sans intervention psychophysique. Le désaccord dans les comparaisons entre l'« Hefner » et la « bougie internationale » pourrait être réduit si les mesures ne dépendaient que de la perfection d'un outillage, mais aucune règle ne peut concilier les divergences de jugements subjectifs.

(<sup>1</sup>) Voir comptes rendus dans *R. G. E.*, oct. nov. et déc. 1929.

La définition physique du flux lumineux s'obtient en explicitant la notion de luminosité monochromatique; le symbole du flux lumineux se présente alors sous forme d'une intégrale

$$F = \int K_\lambda \frac{e_\lambda}{t} d\lambda;$$

$e_\lambda d\lambda$ , désigne l'énergie des radiations comprises dans l'intervalle spectral  $d\lambda$ , au voisinage de la longueur d'onde  $\lambda$ ;  $K_\lambda$  est un coefficient arbitraire choisi pour exprimer la luminosité de l'unité de puissance rayonnée, fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ . L'élément d'intégrale  $K_\lambda e_\lambda/t d\lambda$ , mesure en *lumens* la luminosité de la puissance rayonnée dans l'intervalle  $d\lambda$ , vers la longueur d'onde  $\lambda$ . Cette luminosité monochromatique peut être aussi utilisée pour une définition physique de la couleur dans le domaine visuel.

Désignons par  $F_\lambda$ , la « luminosité relative », calculée par la formule

$$F_\lambda = \frac{1}{F} K_\lambda \frac{e_\lambda}{t} d\lambda \quad (1)$$

la courbe spectrale de  $F_\lambda$  représente la couleur au sens visuel, comme la courbe des valeurs relatives de  $e_\lambda$  représente pour les physiciens la couleur au sens étendu à l'ensemble des radiations. Pour caractériser cette couleur visuelle relativement à la couleur d'un éclaircissement type on pourra se référer à la luminosité d'un éclaircissement dans lequel  $e_\lambda$  serait constant; on l'appellera éclaircissement à puissance uniforme. La luminosité relative en ce cas est définie par la formule,

$$\mathcal{F}_\lambda = K_\lambda \int K_\lambda d\lambda.$$

Le rapport  $c_\lambda = F_\lambda/\mathcal{F}_\lambda$ , définit un facteur de couleur dont la courbe spectrale représente d'une façon détaillée la différence de composition colorée entre le flux  $F$  et un flux sensiblement blanc; l'écart relatif de luminosité pour chaque radiation est en effet donné par la différence  $c_\lambda - 1$  (2).

On peut utiliser aussi la luminosité relative au calcul d'un ensemble de trois nombres représentant la couleur physique à la façon des coordonnées trilineaires employées pour traduire la couleur subjective dans la théorie de Young-Helmoltz. Pour cela on sectionne le spectre en trois régions contigües; la région moyenne comprenant les radiations vertes, les régions extrêmes comprenant d'une part les radiations rouges et dans l'autre les radiations bleu-violet.

Les intégrales partielles

$$\int^{(r),(v),(b)} F_\lambda d\lambda \quad \text{et} \quad \int^{(r),(v),(b)} \mathcal{F}_\lambda d\lambda,$$

limitées dans chacune de ces régions, donnent les valeurs  $F_r, F_v, F_b$  et  $\mathcal{F}_r, \mathcal{F}_v, \mathcal{F}_b$  représentant les luminosités partielles rouge, vert et bleu dans les flux  $F$  et  $\mathcal{F}$  comparés. En calculant les rapports respectifs

$$C_r = F_r/\mathcal{F}_r, \quad C_v = F_v/\mathcal{F}_v, \quad C_b = F_b/\mathcal{F}_b,$$

on forme un groupe de trois facteurs qui définissent la couleur dans une sorte de trichromie objective.

La valeur subjective de cette représentation de la couleur est certainement discutable, mais la technique des reproductions colorées paraît utiliser cette analyse physique autant que l'analyse subjective en fonction de trois sensations fondamentales; c'est le cas par exemple de la photographie des couleurs sur les plaques à réseaux colorés et particulièrement sur l'Autochrome Lumière.

(1) Ce calcul n'exige pas la connaissance des valeurs absolues  $K_\lambda, e_\lambda$ ; des nombres proportionnels à ces valeurs suffisent.

(2) La différence  $F_\lambda - \mathcal{F}_\lambda$ , mesurerait un « écart de couleur », mieux défini que le facteur  $c_\lambda$  vers les extrémités du spectre, mais de signification subjective moins satisfaisante.

**Conventions numériques et unités.** — La forme d'intégrale employée pour définir le flux lumineux ne change pas l'enchaînement des grandeurs adopté par la Commission Internationale de l'Éclairage. Toutefois la définition du *lumen*, unité de flux, doit être donnée par le choix de la fonction qui règle les valeurs de  $K_\lambda$ , luminosité monochromatique du watt. La représentation du lumen se trouvera toujours dans les étalons primaires qui définissent actuellement la bougie internationale et éventuellement dans toute source pour laquelle on aura déterminé soit la loi spectrale de distribution de l'énergie en valeur absolue, soit la loi de luminosité relative par rapport à l'étalon primaire, loi dont la connaissance n'exige que des mesures physiques monochromatiques (1).

Le renversement de la définition du lumen se fera sans difficulté; la courbe spectrale de puissance rayonnée par les étalons représentatifs de la bougie internationale est connue avec une aussi bonne approximation que la valeur subjective du lumen (2), et les valeurs de  $K_\lambda$  peuvent être explicitées sans risques de diminuer l'approximation des données photométriques recueillies jusqu'à présent, quel que soit l'ordre adopté pour la définition de l'unité. On pourrait ainsi fixer à 620 lumens la valeur maxima de  $K_\lambda$ .

Le choix des valeurs  $K_\lambda$  repose sans doute sur les résultats d'expériences subjectives, exprimés par les courbes spectrales de « visibilité relative » la visibilité maxima étant prise pour unité (visibilité est le mot généralement adopté, mais correspond exactement à l'idée de luminosité). Depuis la réunion de la Commission Internationale de l'Éclairage à Genève, en 1924, on semble d'accord pour accepter la courbe moyenne des résultats rassemblés par Gibson et Tyndall.

Il serait bien préférable de choisir une fonction algébrique se prêtant à un calcul numérique simple. En adoptant une valeur moyenne d'expériences subjectives on rend possible la révision indéfinie des nombres, en conséquence d'expériences nouvelles. Déjà des réserves ont été faites sur l'opportunité des valeurs indiquées par Gibson et Tyndall pour les radiations des extrémités du spectre visible, bleu ou rouge. Cela rappelle, dans des conditions encore plus défavorables, l'inconvénient de la liaison des unités métriques avec des grandeurs dont la mesure se fait avec une approximation limitée, le mètre avec le méridien terrestre, le kilogramme avec le décimètre cube d'eau distillée.

Dans le cas présent la signification de la moyenne des expériences subjectives ne comporte en réalité qu'une approximation grossière, impossible à modifier quelle que soit la multiplicité des expériences. Cette moyenne n'est pas en effet la valeur la plus probable parmi les individus ayant fourni les résultats d'expériences; ces résultats individuels, pour les longueurs d'ondes de visibilité moyenne, 0,5, par exemple, se répartissant d'une façon *uniforme* entre 0,4 et 0,6; l'approximation subjective est donc et restera toujours de  $\pm 20$  pour 100. Il en est de même pour la valeur de la longueur d'onde correspondant au maximum de visibilité, valeur variant entre 0,54  $\mu$  et 0,57  $\mu$ ; cette variation limite à l'approximation précédente les comparaisons d'éclairéments hétérochromes.

La courbe moyenne de Gibson et Tyndall n'est donc pas spécialement qualifiée pour le choix d'une unité de mesure.

(1) Les comparaisons spectrophotométriques de deux flux,  $F$  et  $F'$ , font connaître les rapports  $i_\lambda$  des éléments de luminosité,  $i_\lambda = \frac{F' \cdot F_\lambda d\lambda}{F \cdot F_\lambda d\lambda}$ ; on calcule le rapport global  $i$  ou la valeur  $F'$ , si  $F$  est connu, par la relation  $i = \frac{F'}{F} = \int F_\lambda i_\lambda d\lambda$ ; le détail des luminosités relatives se calcule par la formule  $F' = F \cdot i / i$ .

(2) La comparaison des étalons primaires à filament de carbone se fait avec une approximation de quelques millièmes; mais la liaison de ces étalons aux étalons secondaires de travail (tungstène en atmosphère gazeuse) comporte une indétermination de plusieurs centièmes; il en est de même pour le rapport de l'Hefner à la bougie internationale. L'approximation sur la mesure de la brillance d'un « corps noir » défini n'est pas moindre dans les expériences déjà faites et peut s'améliorer prochainement par les expériences en cours; elle dépend essentiellement de l'évaluation d'une température, donc de la perfection d'une mesure purement physique.

On peut conserver une représentation subjective assez proche de la moyenne en adoptant pour loi de la visibilité relative  $u_\lambda$ , la formule :

$$\log u_\lambda = -120 (\lambda - 0^\mu,56)^2;$$

la luminosité relative du rayonnement de puissance uniforme est alors

$$\mathcal{F}_\lambda = \sqrt{\frac{276,3}{\pi}} u_\lambda; \quad (276,3 = 120 \mathcal{E}.10).$$

La courbe spectrale de visibilité suivant cette formule a la même valeur intégrale,  $\int u_\lambda d\lambda$ , à 2/1000 près, que la courbe de Gibson et Tyndall; les valeurs moyennes s'y retrouvent pour les mêmes longueurs d'onde; les branches de courbes sont très concordantes du côté  $\lambda > 0,56 \mu$ ; il y a au contraire divergence assez notable pour les  $\lambda$  décroissants: la courbe subjective se prête mal ici à une représentation algébrique; toutefois la courbe exponentielle reste nettement dans la marge des écarts individuels. Les concordances entre la courbe exponentielle et la courbe expérimentale moyenne se répètent quand on fait l'application de l'une et de l'autre au calcul des luminosités relatives de rayonnement du « corps noir » entre 5 000 et 2 000 degrés. Le bénéfice moral en quelque sorte du choix de cette fonction algébrique ne serait donc pas diminué par un défaut excessif dans sa valeur subjective: il est bien certain qu'elle garderait toujours à ce point de vue une vraisemblance suffisante.

Pour la colorimétrie, les coefficients de couleur envisagés précédemment ne demandent pas de convention nouvelle. Il en serait autrement si on voulait définir ces coefficients par comparaison des flux à la « lumière blanche ». Pour éviter toute hésitation causée par des considérations subjectives, la comparaison avec le rayonnement de puissance uniforme paraît préférable. Quelle que soit la définition adoptée pour la lumière blanche, sa luminosité relative différera peu en valeur absolue de celle du flux à puissance uniforme; à l'extrémité violette du spectre la différence relative peut atteindre 20 pour 100, mais pour les sources usuelles la luminosité est alors si faible que cela ne change guère la signification des facteurs de couleur correspondants; en tous cas il n'en résulte aucune différence appréciable dans le calcul des intégrales partielles de luminosités relatives pour chacune des sections spectrales délimitées en vue d'une expression trichrome.

Pour cette dernière forme d'expression de la couleur il reste à faire une convention sur les valeurs de  $\lambda$  limitant le sectionnement spectral; des raisons techniques peuvent appuyer le choix des valeurs  $0,49 \mu$  et  $0,59 \mu$ ; pour le réglage des instruments effectuant les intégrations partielles trichromes on dispose alors de la flamme sodée et de l'arc au mercure donnant objectivement par les raies  $0,589 \mu$  et  $0,492 \mu$  les limites du vert moyen dans lequel elles sont incluses; de plus la valeur  $0,400 \mu$  pour cet intervalle peut faciliter les intégrations graphiques sur les courbes spectrales représentant la luminosité relative.

**Outillage des mesures.** — L'instrument de mesure des qualités lumineuses ainsi définies est un spectrophotomètre; il faut une dispersion permettant de relever les courbes spectrales de luminosité avec un détail suffisant et autant que possible par intervalles se liant sans discontinuité. Si on se borne à l'analyse trichrome réduite à trois observations sur les régions spectrales rouge, vert et bleu, la sensibilité de l'appareil récepteur du flux, cellule photoélectrique, doit être réglée de telle sorte que l'effet mesuré soit, pour chaque radiation monochromatique, proportionnel à la luminosité conventionnelle. Cela s'obtient par dispersion préalable et réglage par un diaphragme d'une loi convenable de transmission pour chaque radiation. On pourrait imaginer aussi des filtres correcteurs, mais la préparation de filtres ajustés à un récepteur sélectif pour lui donner une sensibilité définie est plus difficile et incertaine que le réglage d'un diaphragme dans l'instrument dispersif: les filtres ne peuvent convenir qu'à un outillage technique pour des comparaisons empiriques.

Nous avons présenté en mai 1929, à une séance de la Société de Physique, section de Lyon, un appareillage pour la mesure physique des qualités lumineuses, composé avec les éléments suivants. Une cellule photoélectrique reçoit le flux émergent d'un système dispersif, réseau moulé entre deux lentilles de 90 mm de distance focale; une fente fixe est dans le plan focal de l'une; le plan focal de l'autre contient une seconde fente ou un diaphragme ouvert sur une certaine étendue de l'image spectrale de la première fente; ce diaphragme est limité dans le sens de la longueur de la fente de façon que l'intensité d'action photoélectrique soit, pour chaque radiation, proportionnelle à sa luminosité. La finesse de l'analyse spectrale est limitée par une largeur de fente correspondant à  $1/15$  de l'étendue spectrale visible. Un amplificateur électrométrique à deux étages, type décrit par J.-F. Thovert, (*Bulletin de la Société de Physique*, mai 1928, p. 76, S.) indique les courants photoélectriques sur le milliampèremètre de sortie: un microampère, limite de stabilité et de lecture des courants, correspond à  $10^{-15}$  amp. dans la cellule.

Devant le diaphragme d'entrée on peut disposer des formes variées de champs photométriques pour la comparaison des sources lumineuses ou des éclairagements directs, réfléchis ou diffusés.

L'appareil réalisé permettait avec une cellule au potassium hydruré, malgré sa faible sensibilité dans le rouge, des mesures spectrophotométriques avec une approximation convenable. Cet ensemble comporte d'ailleurs toutes les possibilités d'amélioration qui peuvent en justifier l'emploi pour les déterminations les plus précises. Un dispositif d'enregistrement, l'utilisation de cellules à sélectivité plus favorable qui seront bientôt, on l'espère, de fabrication courante, peuvent donner à l'appareil les qualités de sensibilité et de rapidité nécessaires à un outillage technique et précis pour la mesure de toutes les qualités lumineuses.

**Conclusion.** — Des appareils de constitution semblable ont été présentés aux Etats-Unis et sans doute seront aussi rapidement établis en d'autres pays. Le moment semble donc bien venu d'organiser un système de photométrie physique.

Les travaux d'ordre psychophysique ne seront pas arrêtés par cette organisation: l'intérêt de recherches physiologiques ne peut être diminué par la possibilité d'en exprimer les résultats avec des unités objectivement définies. La comparaison des qualités individuelles en ce qui concerne la réponse aux excitations lumineuses peut donc toujours être l'objet d'expériences nombreuses et intéressantes du point de vue physiologique; mais il paraît logiquement inutile et pratiquement gênant de conserver une liaison entre les résultats de ces études et la grandeur des unités servant à la mesure des qualités d'un flux lumineux.

Nous espérons que la Commission Internationale de l'Eclairage, sensible aux progrès certains dans la précision des mesures spectrophotométriques, orientera rapidement dans la voie physique la définition du lumen et les mesures colorimétriques.