RECHERCHES SUR LA COMPARAISON PHOTOMÉTRIQUE DES SOURCES DIVER-
SEMENT COLORÉES, ET EN PARTICULIER SUR LA COMPARAISON DES
DIVERSES PARTIES D'UN MÊME SPECTRE ⁽¹⁾.

PAR MM. J. MACÉ DE LÉPINAY ET W. NICATI.

I. Toute méthode photométrique repose sur la possibilité d'apprécier l'égalité d'éclairage de deux surfaces éclairées l'une par la première, l'autre par la seconde des deux sources lumineuses étudiées.

Cette appréciation, qui semble au premier abord impossible dans le cas de sources diversement colorées, peut se faire néanmoins avec une certaine exactitude, et cela de deux manières distinctes, en prenant pour point de départ deux fonctions de l'œil bien différentes, qui nous semblent correspondre aux deux expressions *voir* et *distinguer* ⁽²⁾.

1^o Quelque différentes que soient les colorations des deux surfaces voisines que l'on compare, l'expérience montre que, si l'on fait varier l'intensité d'éclairage de l'une d'elles, l'œil pourra apprécier avec une certaine exactitude l'instant où ces deux surfaces paraîtront également éclairées, l'instant, en d'autres termes, où elles paraîtront avoir *même clarté* ⁽³⁾.

Cette appréciation, toutefois, ne se fait avec quelque précision qu'à la condition essentielle *que les surfaces à comparer soient suffisamment petites*. Nous avons fait usage d'un photomètre de Rumford, dont la tige opaque avait seulement 0^m,001 de diamètre.

⁽¹⁾ Dans cet article, nous nous proposons uniquement d'exposer les principaux résultats de nos recherches. Pour tout ce qui est relatif à la description des appareils et aux détails des expériences, nous prions le lecteur de se reporter au Mémoire complet qui paraîtra prochainement dans les *Annales de Chimie et de Physique*. Toutes ces recherches ont été effectuées dans l'une des salles de l'Observatoire de Marseille, gracieusement mise à notre disposition par M. Stéphan, directeur.

⁽²⁾ Voir, pour la discussion des méthodes, *Annales de Chimie et de Physique*, novembre 1881.

⁽³⁾ Méthode employée par Fraunhofer (*Denkschriften der Bayrischen Akademie*, 1815) et O.-N. Rood (*Journal de Physique*, t. VIII, p. 215).

2° Nous pouvons également prendre comme point de départ la faculté de l'œil de nous faire distinguer les détails des petits objets, noirs sur fond blanc, tels que des caractères d'imprimerie. On sait que, quelle que soit la coloration de la source éclairante, cette facile distinction diminue avec l'intensité de l'éclairage, et augmente avec elle. En d'autres termes, l'acuité visuelle augmente et diminue en même temps que l'intensité lumineuse objective ⁽¹⁾.

Nous pourrions donc considérer deux quantités de lumière comme égales entre elles lorsque, éclairant un même objet incolore (noir sur fond blanc), placé toujours à la même distance de l'observateur, elles lui en font percevoir les détails avec la même netteté, ou encore *lorsqu'elles ramènent l'acuité visuelle à la même valeur* ⁽²⁾.

Ces deux définitions, également rationnelles, ne sont nullement équivalentes : nous avons eu précédemment l'occasion de l'établir ⁽³⁾. C'est ce qui ressortira plus complètement des mesures que nous avons effectuées sur les radiations simples du spectre par l'une et l'autre de ces deux méthodes photométriques.

II. Mais, avant d'exposer les résultats de nos recherches, il est nécessaire de définir deux termes, dont l'emploi s'impose dans toute comparaison photométrique de sources colorées.

Helmholtz a montré, comme conséquence du phénomène que nous avons étudié dans ce recueil même, sous le nom de *phénomène de Purkinje*, que la comparaison des intensités de deux sources colorées n'est en général pas permise. Pour préciser, supposons une source jaune (lampe Carcel, par exemple) et une source bleue placées à la même distance de l'écran, et supposons que cette dernière source soit la plus faible. Nous pourrions ramener les deux ombres à paraître de même clarté, soit en augmentant la quantité de lumière bleue, la source jaune restant immobile,

(1) *Journal de Physique*, 2^e série, t. I, p. 162; 1882.

(2) Ce même principe a été appliqué par Herschel (cité dans la *Physique de Daguin*, t. IV, p. 248), par W. Siemens (*Wiedemann's Annalen*, t. II, p. 521), par nous-mêmes (*Comptes rendus*, mai 1880), et enfin par MM. Crova et Lagarde (*Journal de Physique*, 2^e série, t. I, p. 162; 1882).

(3) Voir *Annales de Chimie et de Physique*; *loc. cit.*

soit en diminuant la quantité de lumière jaune, la quantité de lumière bleue restant invariable. Or ces deux expériences conduisent, pour la valeur de l'intensité de la source bleue, à des nombres qui peuvent être très différents.

Toute difficulté disparaît par l'emploi exclusif des expressions *coefficients d'égale clarté, coefficients d'égale acuité*.

En particulier, s'il s'agit de comparer entre elles les radiations spectrales, nous imaginerons tout d'abord le spectre amené à un état de clarté tel, que la clarté maxima dans le jaune ait une valeur donnée, définie comme égale à celle d'une lampe Carcel étalon, placée à une distance déterminée de l'écran. *Nous appellerons coefficient d'égale clarté relatif à une région quelconque de ce spectre, le nombre qui exprime dans quelle proportion nous devons faire varier la quantité de lumière blanche, pour obtenir en cette région la même clarté que possédait primitivement la partie la plus intense du spectre.*

Les coefficients analogues, déduits de l'observation de l'acuité visuelle, porteront le nom de *coefficients d'égale acuité*.

Toute difficulté provenant du phénomène de Purkinje a bien disparu, car dire qu'en une région du spectre le coefficient d'égale clarté est C revient à exprimer un simple fait expérimental.

III. Les coefficients ainsi définis ne sont point constants. Ils dépendent essentiellement, toutes les autres conditions restant les mêmes, de la clarté à laquelle a été amenée au préalable la radiation la plus intense du spectre. Il est important de connaître tout d'abord les lois de ces variations.

Dans le cas des coefficients d'égale clarté, nous y parviendrons en résolvant tout d'abord le problème suivant : Soient deux sources A et B de couleurs différentes. Représentons par A les quantités de lumière envoyées sur l'écran par l'une ou par l'autre de ces deux sources au moment où elles donnent des ombres de même clarté que l'étalon Carcel placé à 6^m,15 de l'écran. Si nous venons à faire varier dans le rapport de 1 à Q la quantité de lumière envoyée par A, il nous faudra, pour rétablir l'égalité des ombres, faire varier la quantité de lumière envoyée par B dans une proportion Q' en général différente de Q. Nous nous sommes proposé

de trouver la relation qui existe entre Q et Q' pour les diverses radiations simples du spectre. Nous choisirons pour source A la radiation jaune la plus intense du spectre.

On peut arriver à cette relation de deux manières. Nous indiquerons ici seulement la plus simple des deux démonstrations que l'on peut en donner ⁽¹⁾.

Nous nous appuierons à cet effet : 1° sur l'énoncé donné par Helmholtz du phénomène de Purkinje : « L'intensité de la sensation est une fonction de l'intensité lumineuse objective qui varie suivant l'espèce de lumière. »

2° Nous admettrons, comme exacte à la fois pour toutes les radiations simples du spectre, la loi de Fechner que « l'intensité de la sensation S varie comme le logarithme de l'intensité lumineuse objective » ⁽²⁾.

3° Nous remarquerons enfin qu'à des ombres de même clarté correspondent évidemment des intensités de sensations égales.

Nous aurons donc, entre les quantités Q de lumière jaune et Q' d'une autre lumière quelconque, capables de donner des ombres de même clarté, la relation

$$S - s = M \log Q = M' \log Q',$$

d'où

$$\log Q = \frac{M'}{M} \log Q', \quad \log Q = A \log Q'.$$

De nombreuses expériences ont vérifié complètement l'exactitude de cette dernière formule. Les écarts entre le calcul et l'observation n'ont, en effet, presque jamais atteint 3 pour 100.

Il suit de là un fait important, c'est que, pour caractériser de la manière la plus complète la marche et l'intensité du phénomène de Purkinje pour une radiation donnée, et dans des conditions déterminées, il nous suffira de connaître la valeur numérique correspondante de la constante A .

⁽¹⁾ La démonstration, plus longue, donnée par nous dans les *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (20 mars 1882), a l'avantage de reposer directement sur la loi de Bouguer-Masson. La loi de Fechner n'étant, du reste, qu'une interprétation de cette loi, les deux démonstrations rentrent au fond l'une dans l'autre.

⁽²⁾ *Optique physiologique*, p. 312 (414).

Si nous remarquons de plus que, pour toutes les radiations spectrales, comparées à la radiation jaune, nous avons trouvé $A < 1$, nous pourrions dire :

L'intensité du phénomène de Purkinje, d'autant plus grande que A est plus différent de l'unité, pourra être caractérisée par la valeur numérique de $1 - A$.

Un fait capital, que nous ne ferons toutefois que signaler ici, est le suivant : pour chacune des radiations du spectre, l'intensité du phénomène de Purkinje diminue dans de notables proportions en même temps que l'étendue des images rétinienne des deux ombres ; elle varie donc tout à la fois avec la hauteur des ombres et avec la distance de l'observateur à l'écran.

Toutefois, dans le cas d'ombres assez petites pour que l'ouverture du cône sous lequel elles sont vues soit inférieure à $45'$ environ, l'intensité du phénomène de Purkinje devient invariable. C'est à ce cas limite seul que sont relatifs les nombres suivants :

λ .	Valeur de A .
$\lambda > 0,517$	1,000
$\lambda = 0,485$	0,950
0,471	0,913
0,449	0,899
0,430	0,851

Si nous prenons pour abscisses les longueurs d'ondes, pour ordonnées les valeurs de A (diminuées de 0,5), nous obtiendrons la courbe supérieure de la *fig. 1*.

Il est à remarquer que ces expériences confirment complètement une loi que nos recherches antérieures, fondées sur le principe des acuités visuelles, nous avaient permis de démontrer, et qui peut être énoncée ainsi :

L'intensité du phénomène de Purkinje est nulle, chaque fois que l'on compare entre elles deux radiations quelconques de la moitié la moins réfrangible du spectre. Le phénomène de Purkinje se produit, au contraire, chaque fois que l'on compare à l'une quelconque de ces radiations, l'une des radiations de la moitié la plus réfrangible du spectre, et avec une intensité

qui croît rapidement avec la réfrangibilité de cette dernière ⁽¹⁾.

IV. Des considérations tout à fait analogues à celles que nous venons d'exposer nous ont conduits à trouver une relation entre les quantités q de lumière jaune et q' de lumière bleue qui donnent des acuités visuelles égales.

MM. Sous et Charpentier ont, en effet, démontré que l'acuité visuelle variait comme le logarithme de l'intensité lumineuse objective. Cette loi, appliquée aux nombres inscrits dans le Tableau III de notre précédent article ⁽²⁾, se trouve être con-

Fig. 1.

firmée complètement, dans le cas des radiations jaunes, et avec une assez grande approximation pour les radiations bleues. On trouve de la sorte

$$V - 0,33 = 0,2118 \log q = 0,2118 \cdot B \log q',$$

d'où

$$\log q = B \log q'.$$

⁽¹⁾ Voir HELMHOLTZ, *Pogg. Annalen*, t. XCIV, p. 19.

⁽²⁾ *Journal de Physique*, 2^e série, t. I, p. 37. Il est important de remarquer que, dans toutes les expériences qui ont servi à établir ce Tableau, l'objet dont on cherchait à distinguer les détails était constamment vu sous un angle inférieur à 45'.

Les valeurs de B ainsi calculées sont les suivantes

λ .	Valeur de B.
$\lambda > 0,507$	1,000
$\lambda = 0,497$	0,761
0,458	0,559
0,442	0,530
0,428	0,481

Ces valeurs de B ont servi à construire la courbe inférieure de la *fig. 1*.

De la comparaison des deux courbes de cette figure on tire immédiatement la loi suivante : *Le phénomène de Purkinje, tel qu'il ressort des expériences fondées sur l'acuité visuelle, se produit avec une intensité de beaucoup supérieure à celle avec laquelle il se manifeste dans les expériences fondées sur les clartés égales.*

V. Au moyen des deux formules que nous avons établies, il nous sera facile de calculer les variations que subissent les coefficients d'égale clarté, ou d'égale acuité, lorsqu'on augmente dans le rapport de 1 à Q la proportion de lumière jaune de la région la plus intense du spectre. On démontre, en effet, sans peine les relations

$$\log C_q = \log C_1 + \frac{1-A}{A} \log Q \text{ (clartés égales)}$$

et

$$\log C_q = \log C_1 + \frac{1-B}{B} \log Q \text{ (acuités égales)}.$$

VI. Dès nos premières recherches sur la détermination des coefficients d'égale clarté, nous nous sommes trouvé en présence d'une difficulté inattendue, et qui est d'une très grande importance. Voici une expérience simple, souvent répétée par nous, en présence de divers observateurs, et qui permet de la constater facilement.

Au moyen d'un photomètre de Rumford (*fig. 2*) et de deux sources, l'une jaune (lampe modérateur et verre jaune), l'autre bleue (lumière Drummond et sulfate de cuivre ammoniacal), nous donnions naissance à deux ombres de 0^m,001 de large sur 0^m,008 de hauteur. L'observateur se plaçant à 0^m,30 en avant de l'écran,

on déplaçait la source jaune jusqu'à obtenir l'égalité de clarté des ombres.

Dans ces conditions, on constate immédiatement que si l'observateur se rapproche, ce qui a pour résultat d'accroître l'étendue des images rétiniennes des ombres, l'égalité de clarté cesse ;

Fig. 2.

l'ombre bleue paraît beaucoup plus éclairée que l'ombre jaune. L'inverse se produit si l'observateur s'éloigne au delà de $0^m,30$, ce qui a pour résultat de diminuer l'étendue impressionnée de la rétine.

Nous n'insisterons pas davantage sur ce phénomène, que nous avons étudié en détail. Nous ne signalerons parmi les résultats de nos recherches que le suivant :

Les coefficients d'égale clarté deviennent indépendants de l'étendue impressionnée de la rétine, du moment que l'ouverture du cône, sous lequel on voit l'une ou l'autre des deux ombres, est plus petite que $45'$ environ.

Cette loi nous semble importante, car elle indique nettement les circonstances dans lesquelles on doit nécessairement se placer dans toute expérience photométrique relative à des sources diversement colorées. Ces conditions ont été satisfaites dans toutes les expériences dont nous donnons plus loin les résultats.

VII. Nous n'entrerons point dans le détail des expériences que nous avons effectuées par l'une ou l'autre méthode sur le spectre solaire. Pour ce qui est des mesures fondées sur le principe des clartés égales, la *fig. 2* permet de se rendre immédiatement compte de la forme du photomètre employé. Il nous suffira de dire que le petit écran blanc central était blanchi au sulfate de ba-

ryte, récemment précipité. La couche blanche, parfaitement mate et inaltérable, était fréquemment renouvelée.

Dans le cas des mesures fondées sur le principe des acuités égales, effectuées avec le même appareil spectral que les précédentes et dans les mêmes régions du spectre, le signe employé est celui que nous avons précédemment décrit (*fig. 3*). Nous le

Fig. 3.

reproduisons ici en vraie grandeur. Les traits, d'un noir absolu (¹), se détachaient sur un fond blanchi également au sulfate de baryte.

Tous les nombres que nous donnons plus loin ont été rapportés au spectre normal par un procédé de calcul analogue à celui que MM. Crova et Lagarde ont décrit récemment dans ce journal.

TABLEAU I (²).

Coefficients d'égale clarté dans le spectre normal.

λ .	$Q = 0,25$.	$Q = 0,50$.	$Q = 1,00$.	$Q = 1,25$.	$Q = 2,50$.
0,670	44,33	44,33	44,33	44,33	44,33
0,625	3,405	3,405	3,405	3,405	3,405
0,589	1,315	1,315	1,315	1,315	1,315
0,561	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015
0,537	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100
0,517	1,933	1,933	1,933	1,933	1,933
0,500	5,174	5,259	5,345	5,369	5,461
0,485	11,40	11,82	12,26	12,40	12,87
0,471	18,80	19,87	21,00	21,41	22,59
0,459	35,94	38,56	41,36	42,40	45,38
0,449	49,63	54,07	58,91	60,73	65,97
0,439	71,02	78,41	86,57	89,59	98,67
0,430	116,1	130,0	145,5	151,3	168,9

VIII. Le Tableau I donne les valeurs des *coefficients d'égale clarté* pour divers degrés de clarté de la radiation la plus intense

(¹) Ils étaient découpés à jour dans une feuille de papier, en arrière de laquelle se trouvait une cavité profonde dont les parois étaient recouvertes de velours noir.

(²) Dans ce Tableau, les nombres inscrits dans la quatrième colonne ont été directement déterminés. Les autres en ont été déduits au moyen de la formule précédemment démontrée.

du spectre normal ($\lambda = 0^{\mu},555$ environ). Cette clarté maximum est mesurée par la quantité Q de lumière de l'étalon Carcel qui lui est équivalente. Nous avons pris comme unité de quantité de lumière celle qu'envoie l'étalon Carcel placé à $6^m,15$ de distance de l'écran.

Les coefficients d'égale clarté, constants dans toute la moitié la moins réfrangible du spectre, augmentent, dans la partie la plus réfrangible, à mesure que la clarté du jaune spectral augmente : cette dernière variant dans le rapport de 1 à 10, le coefficient relatif au voisinage de la raie G augmente dans le rapport de 1 à 1,455.

IX. Pour ce qui est des nombres obtenus dans nos expériences fondées sur le principe des acuités visuelles égales, il est inutile de les reproduire dans un Tableau spécial. Il est facile en effet de les obtenir en combinant les nombres inscrits dans les Tableaux I, II et III.

X. Si nous comparons entre elles les valeurs des coefficients d'égale acuité ($C.e.a$) et d'égale clarté ($C.e.c$), *obtenues dans les mêmes conditions de clarté du jaune spectral*, nous obtenons les résultats consignés dans les deux Tableaux suivants. Le premier est relatif à toutes les radiations de la moitié la moins réfrangible du spectre, pour lesquelles le rapport $\frac{C.e.a}{C.e.c}$ est constant; le second, aux radiations les plus réfrangibles du spectre, pour lesquelles le rapport des deux coefficients augmente rapidement avec la valeur de la clarté de la radiation jaune.

TABLEAU II.

$\lambda.$	$\frac{C.e.a}{C.e.c}$
$0^{\mu},670$	0,945
0,625	0,753
0,589	0,767
0,561	0,989
0,537	1,055
0,517	1,180

TABLEAU III (1).

$\lambda.$	$\frac{C.e.a}{C.e.c}$		
	$Q = 0,25.$	$Q = 0,50.$	$Q = 1,25.$
$0^{\mu},500$	2,240	2,603	3,162
0,485	3,127	4,309	6,585
0,471	4,408	6,623	11,33
0,459	5,164	8,153	15,11
0,449	5,668	9,392	18,24

(1) Les coefficients d'égale acuité qui correspondent à la deuxième colonne de

Si l'on prend pour abscisses les longueurs d'onde, pour ordonnées les valeurs du rapport des deux coefficients inscrites dans ces Tableaux, on obtient les trois courbes de la *fig. 4*, courbes

Fig. 4.

qui ont une partie commune (depuis le rouge jusqu'au vert, $\lambda = 0^{\mu}, 517$).

XI. De l'examen, soit des nombres inscrits dans ces Tableaux, soit de l'une quelconque des trois courbes de la *fig. 4*, on peut tirer les conclusions suivantes :

Le spectre se partage nettement, au point de vue de la question qui nous occupe, en deux régions, limitées très sensiblement, sinon

---

ce Tableau ont été déterminés directement. Les autres en ont été déduits au moyen de la formule précédemment démontrée.

exactement, à la radiation même à partir de laquelle le phénomène de Purkinje devient sensible ($\lambda = 0^{\mu}, 517$).

Dans la partie du spectre la moins réfrangible, jusqu'en ce point, les coefficients d'égalité restent voisins des coefficients d'égalité de clarté, et le rapport $\frac{C.e.a}{C.e.c}$ ne croît que lentement lorsque la longueur d'onde diminue ⁽¹⁾.

Dans la partie du spectre la plus réfrangible ($\lambda < 0^{\mu}, 517$), le rapport des deux coefficients augmente brusquement et avec une très grande rapidité lorsque la longueur d'onde diminue. En d'autres termes, si l'on éclaire une même page imprimée successivement avec des quantités de lumière jaune et de lumière bleue *de même clarté*, il pourra se faire qu'on puisse la lire avec facilité dans le premier cas et qu'elle soit complètement illisible dans le second.

Ces mêmes inégalités entre les deux coefficients dans la moitié la plus réfrangible du spectre s'accroissent très rapidement lorsque l'intensité de l'éclairage augmente, et deviendraient énormes si l'on considérait ce qui se passe pour des degrés usuels d'éclairage ⁽²⁾.

XII. Nous signalerons ici quelques-unes des conséquences des faits que nous avons établis et des lois qui les régissent.

Ces faits nous semblent pouvoir expliquer, en partie tout au moins, comment il peut se faire que la dispersion par les milieux de l'œil ne nous gêne en rien pour la distinction nette des objets. Les résultats obtenus par nous peuvent en effet s'énoncer ainsi : *La distinction nette des objets est due presque exclusivement à l'éclairage produit par la moitié la moins réfrangible du spectre normal.* Or c'est pour cette moitié la moins réfrangible

⁽¹⁾ Les irrégularités que présentent les courbes de la *fig. 4*, dans le rouge, s'expliquent par le fait que le signe employé pour les mesures d'acuité présente une largeur de $0^{\mu}, 005$. Il y a donc incertitude au sujet de la longueur d'onde exacte à laquelle doit être rapportée chacune des mesures de coefficient d'égalité d'acuité incertitude notable surtout dans les régions du spectre où la dispersion est la plus faible, c'est-à-dire dans le rouge.

⁽²⁾ Nous entendons par là les intensités d'éclairage qui permettraient de lire facilement et sans fatigue, celle, par exemple, qui correspondrait à l'étalon Carcei placé à 1^m de distance ($Q = 37,8$).

que la dispersion par les milieux réfringents transparents est la moins sensible pour une même différence de longueur d'onde.

XIII. *Conséquences relatives à la photométrie des sources colorées.* — 1° Il est bien évident que le but que l'on se propose dans l'éclairage public ou privé est moins de produire sur l'œil une sensation lumineuse plus ou moins intense que de nous faire *distinguer* les objets qui nous entourent. A égale clarté, par conséquent, la supériorité des sources jaunes (becs de gaz intensifs, lampes électriques à incandescence) sur les sources plus riches en radiations bleues (lumière de l'arc électrique) est incontestable (1). Il n'y a donc réclavantage du côté de la lumière de l'arc électrique que dans un seul cas, celui où l'on se propose de revêtir les objets à peu près des mêmes teintes que dans la lumière du jour.

2° Devons-nous conclure de ce qui précède que, pour comparer, au point de vue de leurs valeurs pratiques, deux sources lumineuses de couleurs différentes, on doit renoncer absolument à la comparaison des ombres données par ces deux sources et s'appuyer uniquement sur le principe des acuités visuelles égales ?

Nous croyons qu'une pareille assertion serait trop absolue, mais nous pensons que l'emploi parallèle des deux méthodes photométriques que nous avons étudiées est absolument nécessaire.