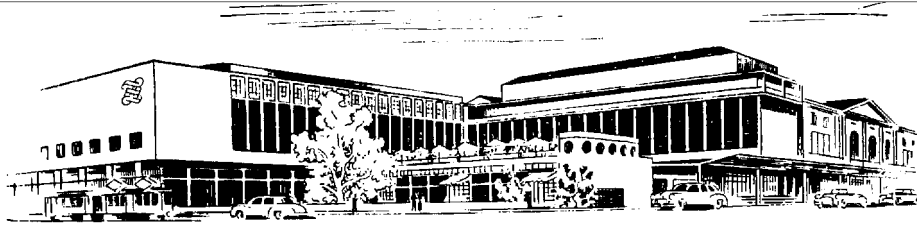


Page Denied



Program
of the 13th Plenary Meeting of the CIE
June 13th to June 22nd 1955
at the Congress-House in Zurich



BULLETIN NO. 3 MAY 1955

ILLUMINATION, INTL. COMMISSION ON (CIE) - 13th Plenary Meeting - Zurich, 13-22 June 55

Contents

Plans of the Congress-House	8
Patronage	3
Signification of the special Congress-badges	6
A Participation Cards	7
B Technical meetings	
1 Place of meetings	7
2 Time and marking of meetings	7
3 Provisional Program	10
4 Languages	20
C Generalities	
5 General-Secretariat (A)	20
6 Ladies' Committee	21
7 Meetings-Secretariat (B)	21
8 Travel- and Bank Agency	21
9 Federal Post Office (PTT)	21
10 Mail Desk	22
11 Posters	22
12 Social Events	23
13 Exhibition of Literature	23
14 Lost Property	23
15 Library of the E.T.H.	23

THE 13TH PLENARY MEETING OF THE CIE 1955
STANDS UNDER THE HONORARY PATRONAGE OF
FEDERAL CONSEILLER DR. PHILIPP ETTER,
HEAD OF DEPARTMENT OF THE INTERIOR

The Committee of Honour

Swiss Confederation	Conseiller fédéral Dr. <i>Pb. Etter</i> , head of the Department of the Interior, Berne
The board of the Swiss Federal Institute of Technology	Prof. Dr. <i>H. Pallmann</i> , President, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich
District of Zurich (Kanton)	<i>F. Egger</i> , President of the government of the District of Zurich
City of Zurich	Dr. <i>E. Landolt</i> , President of the City of Zurich
Swiss Federal Institute of Technology	Prof. Dipl. Ing. <i>H. Weber</i> , Zurich
Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne	Prof. <i>A. Stucky</i> , director of the Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne
Swiss Technical Schools	<i>H. Schöchlin</i> , architect, director of the Technical School of the district, Biel
Swiss bureau of weight and measure	Prof. Dr. <i>H. König</i> , director of the Swiss bureau of weight and measure, Berne
Federal Industry, Trade and Labour office	Dr. <i>M. Kaufmann</i> , Director of the Federal Industry, Trade and Labour office, Berne
Swiss Institution of electrotechnical engineers	Prof. Dr. h. c. <i>F. Tank</i> , President, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich
Association of Swiss electricity suppliers	<i>Ch. Aeschmann</i> , President, Olten
Swiss Society of engineers and architects	Dr. h. c. <i>E. Choisy</i> , President, Satigny

Swiss Society of natural science	Prof. Dr. <i>J. de Beaumont</i> , President, University of Lausanne
Swiss Society of physics	Prof. Dr. <i>P. Huber</i> , President, University of Basle
Swiss Society of Ophthalmology	Prof. Dr. <i>H. Goldmann</i> , director of the ophthalmic hospital of the University of Berne
Swiss Committee on Illumination	Dir. <i>M. Roesgen</i> , President, Geneva
Swiss Center of Illumination Economy	Deputy <i>W. Trüb</i> , President, Zurich
Swiss Association of illuminating engineers	<i>W. von Berlepsch</i> , President, Basle
Group of the manufacturers of incandescent lamps	<i>F. Nägeli</i> sen., President of the board of directors of the Licht AG, Goldau
Swiss Technical Association	Ing. <i>H. Huber</i> , President, Zurich
Electricity supply work of the City of Zurich	<i>H. Frymann</i> , director of the electricity supply work of the City of Zurich
Electricity supply works of the District of Zurich	Prof. Dr. <i>B. Bauer</i> , President of the board of directors of the electricity supply works of the District of Zurich, Küsnacht
Group of the manufacturers of Lamps	Dir. <i>E. Humbel</i> , Zurich

The Organization-Committee

President :	Dipl. Ing. <i>M. Roesgen</i> , director of the electricity supply works of Geneva
1st Vice-President :	Dipl. Ing. <i>R. Spieser</i> , professor at the Technikum at Winterthur, Zurich
2nd Vice-President and General-Secretary :	Dipl. Ing. <i>H. Leuch</i> , Secretary of the Swiss Committee on Illumination, Zurich

Members :
Dipl. Ing. *E. Bitterli*, inspector of the Federal Industry, Trade and Labour office, 3rd district, Zurich
Dr. *W. Kämpfen*, director of the Zurich Tourist Office, Zurich
W. Kessler, lighting-engineer, confidential clerk of Philips AG, Zurich
Prof. Dr. *H. König*, director of the Swiss bureau of weight and measure, Berne
E. Maute, director of the Osram AG, Zurich
R. Meyer, head of department of the electricity supply work of the City of Zurich
Dr. *W. Muri*, delegate of the board of administration of the Philips AG, Zurich
Mrs. H. Spiesser, Zurich

Working Committees

WORKING COMMITTEE 1 : FINANCIAL AFFAIRES

Chairman : Dipl. Ing. H. Leuch, Secretary of the Swiss Committee on Illumination, Zurich
Representative : Dr. F. Wanner, Director of the electricity supply works of the District of Zurich
Members : Prof. Dr. H. König, director of the Swiss bureau of weight and measure, Berne
E. Maute, director of the Osram AG, Zurich
H. Weibel, Chief of the aerodrome section, Federal air office, Berne

WORKING COMMITTEE 2 : SECRETARIAT

Chairman : Dipl. Ing. H. Leuch, Secretary of the Swiss Committee on Illumination, Zurich
Representative : Dr. O. Bucher, Secretary of management, of the Philips AG, Zurich
Members : M. Herzig, lighting-engineer, Belmag AG, Zurich
H. Kürsteiner, Zurich
W. Mathis, lighting-engineer, Siemens EAG, Zurich

WORKING COMMITTEE 3 : TECHNICAL VISITS AND MEETINGS

Chairman : H. Kessler, lighting-engineer, confidential clerk of Philips AG, Zurich
Member : E. Bitterli, inspector of the Federal Industry, Trade and Labour office, 3rd district, Zurich
J. Guanter, lighting-engineer, confidential clerk of Osram AG, Zurich

WORKING COMMITTEE 4 : RECEPTIONS AND ENTERTAINMENTS

Chairman : Dipl. Ing. R. Spieser, professor at the Technikum at Winterthur, Zurich
Members : E. Graf, Electricity supply work of the City of Zurich
R. Meyer, head of department of the electricity supply work of the City of Zurich
Dr. F. Wanner, director of the electricity supply works of the District of Zurich

WORKING COMMITTEE 5 : LADIES' COMMITTEE

Chairwoman : Mrs. H. Spieser, Zurich
Members : Mrs. O. Bitterli
Mrs. M. Frymann

WORKING COMMITTEE 6 : TRAVEL AND CHANGE

Chairman : Dipl. Ing. H. Leuch, secretary of the Swiss Committee on Illumination, Zurich
Representative : L. Zimmermann, lighting-engineer, Erlenbach
Members : Dr. W. Kämpfen, director of the Zurich Tourist Office, Zurich
H. Wettstein, lighting-engineer, Zurich

Signification of the Special Congress-Badges

<i>Members of :</i>	<i>wear</i>
The Honorary Committee	the badge with red and white cord
The Organization-Committee	the badge with blue and white cord
The Working Committee	the badge with blue and white ribbon
The Ladies Committee	the badge with white ribbon
Subaltern staff of Working Committee	<i>no badge;</i> blue and white Rosette with inscription «CIE»
Auxiliary help	<i>no badge;</i> blue and white ribbon with inscription «CIE»

5
X

A. CARDS FOR PARTICIPANTS AND CONGRESS-BADGES

Delegates and their accompanying persons who did not get participation cards before leaving home, can obtain them in Zurich:

June 9th to 12th (evening) at the Inquiry office at the main-station (close to Swissair). During the following opening hours: Thursday to Sunday inclusive 8 a.m. to 9 p.m.

After June 13th cards are obtainable at the Congress-House, at a special ticket-office in the entrance-hall of the Vestibule (Entrance K, Claridenstrasse).

The cards entitle the holders to take part in all the manifestations. For manifestations not attended to, no refund can be made.

On presentation of the participation card the delegates and their accompanying persons will receive the *Congress-badge* which they are requested to wear to all arrangements and meetings.

B. TECHNICAL MEETINGS

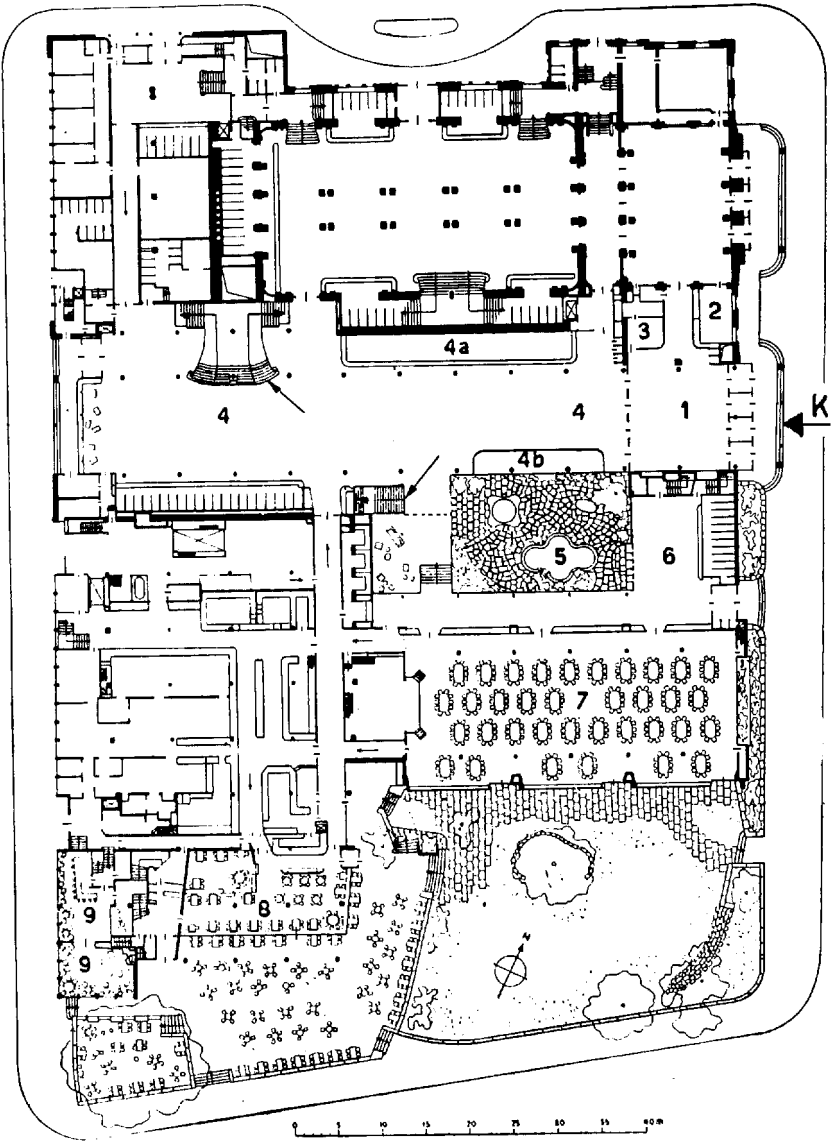
1. Place of Meetings

Kongreßsaal (Congress-hall)
Kammermusiksaal (Chamber-music-hall)
Vortragssaal (Lecture-hall)

These halls are located on the first floor of the Congress-House. They are accessible through entrance K (Claridenstrasse), through the Vestibule, where the General-Secretariat is located, climbing one of the stairs in the background. The latter lead to the Congress-lobby from where the meeting-halls are reached directly. Signs show the way from Vestibule to the meeting-halls. On a black-board near Secretariat A is indicated in which halls the different meetings take place.

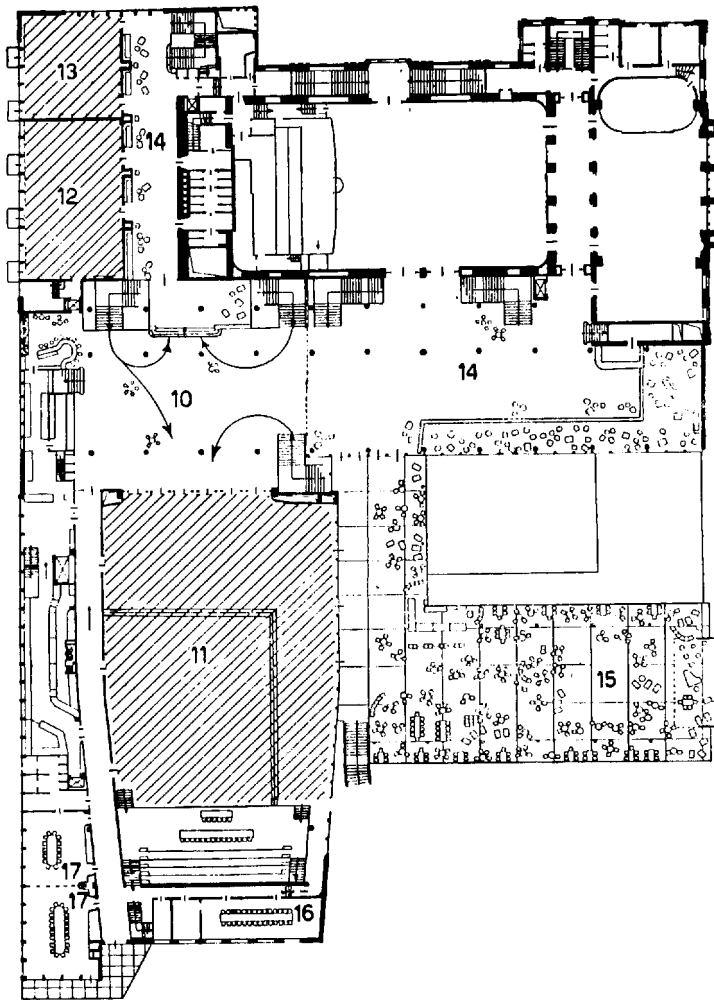
2. Time and Marking of Meetings

In view of the large number of technical meetings which will have to be held on seven week-days, it has become unavoidable as a rule to arrange two meetings at the same time.



Congress-House Zurich, Plan of the Ground Floor

- 1 Entrance Hall to Congress Vestibule
- 2 Post Office
- 3 Travel Agency
- 4 Congress Vestibule
 - a Secretariat
 - b Literature
- 5 Garden Court
- 6 Foyer to Garden Room
- 7 Garden Room (with stage)
- 8 Restaurant
- 9 Lounge (Bar)



**Congress-House Zurich, Plan of the Assembly Floor
(1st floor)**

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| 10 Congress Foyer | 14 Main Foyer |
| 11 Congress Hall | 15 Garden Terrace |
| 12 Conference Hall I | 16 Committee Room |
| 13 Conference Hall II | 17 Conference Halls |

3. Provisional Program

All meetings will be hold at the Congress-house

FRIDAY, JUNE 10

MEETINGS

Morning

09.00

Meeting 1A
Scope Committee

Afternoon

14.00 *Meeting 2A*
Statutes Committee

Meeting 2B
Secretariat
1.3.3 Color of Signal Lights
(U.S.A.)

Meeting 2C
Secretariat
3.1.1.2 Estimation of Comfort
(Australia)

SATURDAY, JUNE 11

MEETINGS

Morning

09.00 *Meeting 3A*
Finance Committee

Meeting 3B
Secretariat
1.3.1 Colorimetry (U.S.A.)

Meeting 3C
Secretariat
1.3.3 Color of Signal Lights
(U.S.A.)

Meeting 3D
Secretariat
3.2 Daylight (Australia)

Afternoon

14.00

Meeting 4
Executive Committee

10

6 X

MONDAY, JUNE 13

MEETINGS

Morning

10.00

Meeting 5
Opening Plenary

Afternoon

14.00

Meeting 6

Paper - A Review of Visual Research in the U.S.A.
U-C by Mr. C. L. Crouch of the U.S.A.
Paper - The Influence of Time of Observation on Threshold Situations
N-F by Messrs. C. J. Fortuin and J. J. Balder of the Netherlands
Paper - Recent Studies of Visual Discrimination
U-B by Mr. H. Richard Blackwell of the U.S.A.

ENTERTAINMENT

Town-hall

18.00 Reception of delegates and ladies by the President of the City of Zurich
Evening free

TUESDAY, JUNE 14

MEETINGS

Morning

09.00

Meeting 7A
Secretariats
3.1.4 Industrial Lighting
(Great Britain)
3.1.5 Mine Lighting
(Belgium)
3.3.2.2 Railway and Dock
Lighting
(Great Britain)

Meeting 7B
Secretariats
3.3.7 Signal Lights (France)
1.3.3 Color of Signal Lights
(U.S.A.)
3.3.3 Airborne Lighting and
Signals (U.S.A.)

Paper - Etude sur la Visibilité dans les Mines
B-P by Mr. Patigny of Belgium
Paper - Dark Adaptation and Miners Nystagmus
G-F by Mr. W. J. Wellwood Ferguson of Great Britain
Paper - A Lumen Method of Design for Mine Lighting Installations
G-Y by Messrs. W. Young, E. L. J. Potts, and W. B. Bell of Great Britain

7
X

Afternoon

14.00 <i>Meeting 8A</i>	<i>Meeting 8B</i>
Secretariat	Secretariat
3.1.1.1 Pre-determination of Illumination and Luminance (U.S.A.)	3.2 Daylight (Australia)

Paper – Contribution à la Recherche d'une
F-D Méthode de Calcul normalisée du Facteur d'Utilisation
by Mr. J. Dourgnon of France
Paper – Computed Coefficients of Utilization
N.Z. by Mr. H. Zijl of the Netherlands

ENTERTAINMENT

For ladies

10.30 to 12.30 Movies
14.00 Bus depart from Congress-House, Entrance U, Gotthardstrasse, for a
sight-seeing trip
Apply for a ticket with your participation card (coupon No. 301)

For delegates and ladies

If the weather is favorable (if not, on June 17)
17.30 Bürkliplatz, pier of the steam-boats
Boat ride on the Lake of Zurich up to Rapperswil with collation
Apply for a ticket with your participation card (coupon No. 201)

WEDNESDAY, JUNE 15

MEETINGS

Morning

09.00 <i>Meeting 9A</i>	<i>Meeting 9B</i>
Secretariats	Secretariats
4.1.1 Education in Schools and Colleges and in Professional Circles (Switzerland)	2.1.2 Sources of u.v. and i.r. radiation (Germany)
4.1.2 Popular Education (U.S.A.)	1.3.1 Colorimetry (U.S.A.)

Paper – Some Measurements on Color Discrimination
N.W. by Messrs. P. L. Walraven and M. A. Bouman of the Netherlands

6
X

Afternoon

<p>14.00 <i>Meeting 10A</i> Secretariats 3.3.1 Street Lighting (Great Britain) 3.3.4 Lighting for Outdoor Sports (Brazil) Paper - Observations on Discomfort N-B Glare in Street Lighting - Influence of the Color of the Light by Messrs. J. B. de Boer and J. F. T. van Heemskerck Veeckens of the Netherlands Paper - Une Installation d'Etude de B-M Luminance en Eclairage public by Mr. Paul Massart of Belgium Paper - Street Lighting and Acci- G-T dents - Some British Investigations by Mr. J. C. Tanner of Great Britain</p>	<p><i>Meeting 10B</i> Secretariat 1.3.2 Color Rendering (Germany) Paper - Propositions concernant E-R l'Evaluation du Rendu des Couleurs by Mme Roy- Pochon of France Paper - Color Rendering by de-luxe N-O Fluorescent Lamps by Messrs. A. A. Kruithof and J. L. Ouweltjes of the Netherlands Paper - An Appraisalment of the J-A Color Rendering Properties of Fluorescent Lamps by Messrs. T. Azuma and L. Mori of Japan</p>
--	---

ENTERTAINMENTS

For ladies

One of the following excursions :

- 10.00 Main-Entrance House Grieder, Bahnhofstrasse
 Visit to Switzerland's Fashion Center Grieder
 or
- 10.00 Bürkliplatz, pier of the steam-boats
 Visit to the Chocolate Factory Lindt & Sprüngli
 or
- 09.00 Congress-House, Entrance U, Gotthardstrasse, bus depart
 Visit to the Shoe Factory and Muscum Bally at Schönenwerd
 Apply for a ticket with your participation card (coupon No. 302)

Technical Visits for delegates and ladies

- 20.30 Parking place, Entrance U of the Congress-House
 a) Visit in groups to the Zurich-Airport (Kloten)
 or

9
X

- Parking place, Entrance U of the Congress-House
 b) Visit to see Lighting-Installations in Zurich
- 20.30 1. Installations for Inside-Illumination
 Machine Laboratory of the Swiss Federal Institute of Technology
 Auditory of the Physical Institute of the Swiss Federal Institute of
 Technology
 or
- 20.30 2. Installations for Inside-Illumination
 Sale rooms, Banks, Insurance Companies
 or
- 20.45 3. Street-Illumination in Zurich
 Testing trakt Hegnau-Dubendorf
 or
- 20.30 Parking place Entrance U of the Congress-House
 c) Visit to the Oskar Reinhart Foundation in Winterthur

On Wednesday, June 15, you have to choose between 5 technical excursions. Apply for a ticket with your participation card (coupon No. 202) in time, as only a limited number of people can participate.

THURSDAY, JUNE 16

MEETINGS

Morning

- | | |
|---|---|
| <p>09.00 <i>Meeting 11A</i>
 Secretariats
 3.1.7 Hospital Lighting
 (Finland)
 2.1.1 Sources of Visible
 Radiation
 (Great Britain)</p> | <p><i>Meeting 11B</i>
 Secretariats
 3.1.9.2 Lighting for Photo-
 graphy Cinema and
 Television Production
 (U.S.A.)
 3.1.9.1 Theater Stage Lighting
 (Great Britain)</p> |
|---|---|

- Paper – Nouvelles Lampes à Incandescence à
 F–P Atmosphère de Krypton et Xénon by Mr. M. R. Penon of France
 Paper – Characteristics of Electroluminescent Cells
 N–K by Mr. H. A. Klasens of the Netherlands
 Paper – Production de la Lumière colorée pour l'Eclairage décoratif
 F–T et pour l'Eclairage par Projection
 by Messrs. F. Tarnay, Roger et Barthes of France

10
 X

Afternoon

14.00 <i>Meeting 12A</i> Secretariat 3.1.6 Lighting of Public Buildings (France)		<i>Meeting 12B</i> Secretariat 3.3.5 Automobile Head and Signal Lighting (Netherlands)
--	--	--

Paper – The Fundamentals of Museum Lighting
 U–H by Mr. Laurence S. Harrison of the U.S.A.

ENTERTAINMENTS

For ladies

10.30 to 12.30 Movies

For delegates and ladies

20.30 At the Congress-House
 Official Banquet

Apply for a ticket with your participation card (coupon No. 203)

FRIDAY, JUNE 17

MEETINGS

Morning

09.00 <i>Meeting 13A</i> Secretariats 3.1.8 Lighting for Selling (France) 3.1.9.3 Lighting for Indoor Games (Sweden) Paper – Entwicklung und praktische H–T Erfahrungen in der Beleuchtung von Tankstellen in der Schweiz by the National Committee of Switzerland Paper – Stand der Beleuchtung H–S von Schulturnhallen in der Schweiz by the National Committee of Switzerland		<i>Meeting 13B</i> Secretariats 1.4.1 Photopic and Scotopic Vision (France) 1.4.2 Glare and Adaptation (Italy) Paper – Neue Untersuchungen D–J über die Wahrnehmungs- schwelle des Auges by Dr. Jainski of Germany Paper – Visual Function of the G–We Retinal Periphery by Mr. R. A. Weale of Great Britain Paper – Physiological Bases of U–F Disability Glare by Mr. Glenn A. Frye of the U.S.A.
---	--	--

“ X

Afternoon

14.00 *Meeting 14A*
 Secretariat
 3.3.2.1 Aviation
 Ground Lighting
 (Netherlands)
 Paper - Le Calcul des Lignes
 F-O d'Approches, Seconde
 Approximation tenant
 Compte des Lois de
 Visibilité oblique
 by Mr. Jean Olivier of France

Meeting 14B
 Secretariat
 3.1.1.2 Estimation in Comfort
 in Lighting (Australia)
 Paper - Subject Additivity of
 U-G Sources of Brightness
 by Mr. S. K. Guth of
 U.S.A.

ENTERTAINMENTS

For ladies

10.00 Swiss National Museum near the Main-Station
 Visit to the Swiss National Museum
 Apply for a ticket with your participation card (coupon No. 303)
 10.30 to 12.30 Movies

For delegates and ladies

(Provided the weather on the 14th has been unfavorable :)
 17.30 Boat ride on the Lake of Zurich up to Rapperswil with collation
 Apply for tickets with your participation card (coupon No. 201)

SATURDAY, JUNE 18

MEETING

Morning

09.00 *Meeting 15*
 Mid-Session Plenary

Afternoon and evening free

16

17 X

SUNDAY, JUNE 19

ENTERTAINMENTS

For delegates and ladies

- 09.00 Departure from the Main-Station
Excursion via Lucerne to the Bürgenstock
Lunch and Five o'clock tea at the Bürgenstock
Stop at Lucerne
22.19 Return to Zurich
23.17 Arrival at Zurich
Apply for tickets with your participation card (coupon No. 205)

MONDAY, JUNE 20

MEETINGS

Morning

- | | | |
|-------|---|------------------------------------|
| 09.00 | <i>Meeting 16A</i> | <i>Meeting 16B</i> |
| | Secretariats | Secretariats |
| | 3.1.2 Home and
Hotel Lighting
(Germany) | 1.1.1 Basic Quantities
(France) |
| | 3.1.3 School and
Office Lighting
(Sweden) | 1.1.2 Vocabulary
(Switzerland) |
| | | 1.2 Photometry (France) |

- Paper – Die Eignung der Xenon-Lampe als Standardlichtquelle
D-F für Strahlungs- und Farbmessungen
by Messrs. H. G. Fruehling, W. Münch, M. Richter of Germany
Paper – The Electrical Measurement of Fluorescent Lamps
U-S by Messrs. Ernest H. Salter, Richard G. Slauer and
Arthur W. Weeks of the U.S.A.

Afternoon

- 14.00 *Meeting 17*
Paper – The Design of the Visual Field –
G-Wa A New Approach to Interior Lighting
by Mr. J. M. Waldram of Great Britain
Paper – Dimensionsbetrachtungen in der Lichttechnik
D-R by Mr. O. Reeb of Germany
Paper – Studies on the Natural Lighting of Interiors
G-H by Messrs. H. G. Hopkinson, A. Pott, D. L. Medd, D. J. Petty,
P. Petherbridge and J. Longmore of Great Britain

ENTERTAINMENTS

For ladies

- 10.30 to 12.30 Movies
14.00 Congress-House, Entrance U, Gotthardstrasse
Excursion to Einsiedeln, visit to the monastery and church
Afternoon tea
Apply for tickets with your participation card (coupon No. 304)

TUESDAY, JUNE 21

MEETINGS

Morning

- | | | |
|---------|---|--|
| 08.30 | <i>Meeting 18A</i> | <i>Meeting 18B</i> |
| | Secretariats | Secretariats |
| 4.2 | Lighting Legislation
(Israel) | 3.3.6 Flood Lighting and
Advertising Signs
(Italy) |
| 3.1.9.4 | Lighting in
Hazardous and
Corrosive Situations
(Great Britain) | 2.1.3 Operating Accessories
(U.S.A.) |

Paper - Flutlicht und Lichtreklame in der Schweiz
H-F by the National Committee of Switzerland

Afternoon

Free

ENTERTAINMENTS

For ladies

- 08.18 Departure from the Main-Station
Visit to the Porcelain Factory at Langenthal
Lunch at the Hotel "Bären" at Langenthal
14.56 Departure from the Station Langenthal to Berne
Apply for tickets with your participation card (coupon No. 305)

For delegates and ladies

- 13.30 Departure from the Main-Station
- Excursion to Berne
- Reception in the Town-hall
- Dinner
- 21.49 Return to Zurich
- 23.18 Arrival at Zurich

Apply for tickets with your participation card (coupon No. 206)

WEDNESDAY, JUNE 22

MEETINGS

Morning

Meeting 19

- Paper – Applications pratiques des Circuits de Polarisation aux Photopiles
- F–B by Mr. G. Blet of France
- Paper – Die DK als bibliographisches Ordnungsmittel der Lichttechnik
- D–K by Mr. W. Koehler of Germany
- Paper – The Application of the Phenomenological Analysis in
- S–H the Realm of Light by Mr. Sven Hesselgren of Sweden
- Paper – A New Recording Spectrophotometer by Mr. M. Sumino
- J–S (to be presented if the Executive Committee approves the application of Japan, with T. C. Report 1.3.1)

Afternoon and Evening

14.00

Meeting 20

Final Plenary and Executive Meetings

THURSDAY, JUNE 23

MEETING

Morning

09.00

Meeting 21

New and Old Administrations

(Presidents, Secretaries, Treasurers and those invited especially by these, only)

15
X

4. Languages

Official languages at the Congress of the CIE are English, French, German. Simultaneous translating devices are at the disposal of delegates in every hall. The latter translate the speakers' address into the other two languages with the aid of a hear phone.

C. GENERALITIES

5. General-Secretariat (A)

The General-Secretariat, telephone (051) 27 56 30 (call 53), is at the disposal of the participants and their accompanying persons for any information required, as for instance:

Information about :

Meetings

- Place and time of meetings of the Technical Committee and the CIE Committees
- Sale of Preprints and other documents of meetings

Arrangements of the CIE

- Exchange of coupons of the participation cards for certificates of Transport, Admission, Provisioning at the different arrangements
- Time and place of gathering

Generalities

- Issuing of participation cards from June 13th on
- Issuing of prepared documents and communications for the reception of the participants of the Congress
- Issuing of Congress-mail
- Bringing together people looking for each-other
- Information regarding entertainments not connected with Congress of the CIE, such as Theater, Concerts, Cinemas
- Information of all kinds about Zurich and Switzerland
- Objects lost and found

6. Ladies' Committee

A special desk deals with information to ladies.

This office is marked:

- « Ladies' Committee »
- « Comité des Dames »

7. Meetings-Secretariat (B)

This has to do exclusively with the arrangements of meetings and clerical work connected with them as well as the making out of reports.

8. Travel- and Bank Agency

For the convenience of the Congress-participants a special office of the American Express Company will be at their disposal in the entrance-hall of the Vestibule. Its functions include information on travelling, railroad and airplane-tickets, money exchange. As a rule the office-hours are as follows:

Monday, June 13th to Wednesday, June 15th	8 a.m. to 6 p.m.
Thursday, June 16th	8 a.m. to 9 p.m.
Friday, June 17th	8 a.m. to 6 p.m.
Saturday, June 18th	8 a.m. to 1 p.m.
Monday, June 20th	8 a.m. to 6 p.m.
Tuesday, June 21th	8 a.m. to 1 p.m.
Wednesday, June 22nd	8 a.m. to 6 p.m.

9. Federal Post Office (PTT)

In the entrance-hall of the Vestibule there is located a Post Office for the Congress-participants. It handles the general mail, transmits telegrams as well as interurban and foreign telephone-calls. Special telephone-booths for town-calls are in the Vestibule and in the lobby of the Congress-House.

For packages and money-orders the ordinary post offices are to be used.

The Federal Post Office in the Congress-House is open:

Monday, June 13th to Friday, June 17th	8.30 a.m. to 12.45 p.m. 1.45 p.m. to 5.45 p.m.
Saturday, June 18th	8.30 a.m. to 1.00 p.m.
Monday, June 20th	8.30 a.m. to 12.45 p.m. 1.45 p.m. to 5.45 p.m.
Tuesday, June 21th	8.30 a.m. to 1.00 p.m.
Wednesday, June 22nd	8.30 a.m. to 12.45 p.m. 1.45 p.m. to 5.45 p.m.

Postal address : c/o CIE-1955, Congress-House, Zurich 54

Telegrams: «ILLUMCONVENT»

The Federal Post Office in the Congress-House is issuing from June 13th to June 22nd a special CIE-stamp which will be quite valuable for philatelists. At the end of the 13th Plenary Meeting this stamp will be destroyed.

10. Mail Desk

Each participant of the Congress will have his own post office box. At least once a day every participant is asked to call at the mail desk to receive the incoming mail or official Congress mail, communications of the presidency of the Congress, etc.

11. Posters

Posters indicate the day before:

- the halls in which the meetings take place
- time and place of the meetings of the following day
- technical excursions
- entertainments
- eventual changes of program
- telegrams, etc.
- persons called for
- objects lost and found

Members of Congress are asked to consult these posters daily at every opportunity offered.

12. Social Events: Dress

As in summer time, the evenings in Switzerland are occasionally rather cool, we recommend participants to provide themselves with coats for eventual trips or entertainments.

To the reception at the Town-hall we recommend street-dress, to the banquet dark suits.

A light lunch is available at the Restaurant of the Congress-House.

13. Exhibition of Literature

The Zurich Booksellers' Union will organize an exhibition of books appertaining to technical literature, as well as works relating to history and history of art about Zurich. At this bookstall in the Vestibule of the Congress-House books, magazines and newspapers will be on sale.

14. Lost Property

Objects found should be handed in to the secretariat which will pass on these objects to the inquiry office of the management of the Congress-House (intermediate story).

15. Library of the Swiss Federal Institute of Technology

This library is open to participants of the Congress:

Reading-room: Monday to Friday	8 a.m. to 12 a.m.
	2 p.m. to 6 p.m.
Saturday	8 a.m. to 12 a.m.
	2 p.m. to 5 p.m.
Lending-Library: Monday to Saturday (window service)	9 a.m. to 11 a.m.
	2.15 p.m. to 5 p.m.

COMMISSION INTERNATIONALE
DE L'ECLAIRAGE

COMMUNICATION
S. O. MAISEL
(URSS)

Treizième session
Zurich, 13—22 juni 1955.

Epreuve
Reproduction interdite

THEORIE DE LA TRANSFORMATION DU FLUX
ENERGETIQUE DANS LA RETINE ET LES PERSPECTIVES
DE SON UTILISATION EN TECHNIQUE D'ECLAIRAGE

Par prof. Serge MAISEL
Institut de la technique de l'éclairage, Moscou

*ILLUMINATION, INTL. COMMISSION ON (CIE) - 13th Plenary
Meeting - Zurich, 13-22 June 55*

**THEORIE DE LA TRANSFORMATION DU FLUX
ENERGETIQUE DANS LA RETINE ET LES PERSPECTIVES
DE SON APPLICATION EN TECHNIQUE D'ECLAIRAGE**

par S. Maisel

Institut de la technique de l'éclairage de l' U R S S, Moscou

1. Une théorie de la transformation du flux énergétique dans la rétine de l'oeil humain fut élaborée au cours de ces dernières années. Elle a pour but de réduire les particularités des phénomènes visuels (en premier lieu ceux de la vision centrale, c'est-à-dire la vision par les cônes) dans toute leur diversité et complexité aux phénomènes spéciaux qui ont lieu dans les cellules réagissant à la lumière. Les photons à fréquences d'oscillation variées venant de l'extérieur et pénétrant dans les cônes sont en partie absorbés par les molécules des substances qui se décomposent sous l'action de la lumière*; c'est ce qui constitue le point de départ des phénomènes de la vision et la première phase de la transformation de la radiation. Pour la vision centrale le processus de transformation fut étudié en tant que processus purement physique; quant aux réactions chimiques dans les cellules on n'en a pas tenu compte à la première approximation.

D'autre part, le récepteur périphérique de l'analyseur visuel lui-même (terminologie de I. P. Pavlov) ne peut pas être considéré comme simple récepteur physique: il constitue une partie de l'organisme. En effet, les processus se développant dans cet organisme, déterminent à un certain degré le cours des phénomènes dans la rétine et comme l'organisme lui-même est dominé par le système nerveux, celui-ci exerce une influence très nette et profonde sur le côté quantitatif de ces phénomènes sans modifier toutefois la nature même des transformations.

* Par la suite ces substances seront désignées par le terme «substances réagissantes».

Aucune théorie ne peut être élaborée sans qu'on n'admette un certain nombre d'hypothèses. Les hypothèses ne peuvent être ni justifiées ni rejetées à priori si elles ne se trouvent pas en contradiction avec des faits bien établis. L'admissibilité d'une hypothèse ne peut être prouvée que si les déductions qu'on en tire concordent avec les faits déjà connus ou nouvellement établis à condition, bien entendu, que ces faits soient incontestables.

D'autre part, il est nécessaire de ne pas oublier qu'aucun groupe d'hypothèses ne peut englober la totalité des phénomènes qui peuvent avoir lieu dans un récepteur vivant aussi complexe que la rétine de l'œil. On est donc amené inévitablement à se contenter tout d'abord d'un rapprochement plus ou moins grossier dans la conception d'un groupe de phénomènes, le plus vaste possible, en laissant aux investigateurs futurs le soin de modifier, d'améliorer ou de rejeter la théorie.

2. Le trait le plus caractéristique de l'analyseur visuel et de son récepteur périphérique de l'énergie extérieure — la rétine de l'œil, consiste en sa variabilité presque illimitée. Cette variabilité, qu'on dirait capricieuse, fut cause d'une série d'insuccès dans les tentatives de trouver une théorie générale du fonctionnement du récepteur, même pour une partie restreinte et déterminée des phénomènes. On est arrivé quelquefois, pour des cas particuliers, à établir une image schématique du processus en cours dans la rétine, mais dans la majeure partie des cas ces schémas ne permettaient pas de caractériser numériquement les phénomènes et maintes fois les tentatives faites afin de vérifier les déductions extraites des schémas proposés conduisaient à leur réfutation.

Il s'ensuivit que nombre d'investigateurs éminents eurent une prévention quant aux schémas et aux théories quels qu'ils fussent, ayant trait aux phénomènes visuels; il s'y manifesta même une tendance qui considéra la quantité de faits connus comme insuffisante à l'édification d'une théorie quelconque. On avança l'idée que le processus de vision qui ne peut être conçu que par l'intermédiaire des sensations, devait être rapporté à une catégorie de phénomènes spéciaux «physico-psycho-physiologiques», qu'il n'y avait pas moyen à l'heure actuelle de concevoir l'essence des phénomènes de ce genre et qu'il suffisait de continuer

leur étude expérimentale en accumulant les faits, en les cataloguant.

Toutefois malgré toute sa variabilité vraiment extraordinaire et le pouvoir d'adaptation à des conditions extérieures très différentes, et précisément à cause de ces propriétés, l'analyseur visuel exerce admirablement ses fonctions qui sont de beaucoup les plus importantes entre celles des autres analyseurs quant à l'orientation dans un milieu extérieur en état de changement perpétuel.

Ceci signifie que des propriétés constantes (suffisamment) de l'analyseur visuel sont cachées sous l'aspect de la variabilité qui embrouille les conceptions coutumières sur les récepteurs de l'énergie extérieure: il ne s'agit que de les découvrir pour en faire un point d'appui.

Après avoir mis en évidence et formulé les conditions fondamentales qui déterminent l'essence et l'allure générale de la transformation du flux énergétique dans la rétine et après avoir introduit quelques hypothèses indispensables en accord avec les faits connus et suffisamment vérifiés, on peut construire le schéma des phénomènes visuels dans toute leur complexité et vérifier les déductions qu'on en tire par des faits bien connus. En même temps on ne peut tenir compte de toute une série de points de vue usuels même si ces derniers sont généralement admis et paraissent être hors de doute. Il ne faut pas oublier que le refus ou l'impossibilité d'analyser les phénomènes visuels dans leur essence même et la tentative faite pour se borner à l'établissement de corrélations formelles n'ont pas pu ne pas se faire sentir lorsque ont été admises certaines thèses incapables de résister à une critique sérieuse.

3. Les points fondamentaux et les plus importants de la théorie de la transformation du flux énergétique dans la rétine peuvent être formulés de la façon suivante:

a) La première phase du processus de la vision consiste dans la dissociation des molécules à structure complexe, des substances réagissantes des cônes grâce à l'absorption de l'énergie des photons d'une longueur d'onde arbitraire dans le domaine du spectre visuel.

b) Pour dissocier une molécule quelconque de la substance réagissante il faut qu'elle se trouve sur le trajectoire d'un photon, quoique ce fait ne suffise pas à lui seul; l'éventualité de la rencont-

re d'un photon et d'une molécule de la substance réagissante dans les cônes est très faible. Avec un nombre N de molécules l'éventualité est de N fois plus grande.

c) La dissociation de chaque molécule de la substance réagissante produit deux ions qui, sous l'action d'un champ électrique toujours présent dans la rétine, se dirigent: le positif vers l'enveloppe du membre extérieur du cône et le négatif vers le premier synapse.

d) Chaque fois que le premier synapse est touché par un certain nombre q de ions négatifs il en résulte une deuxième transformation qui produit une impulsion électrique dans la fibre du nerf optique relié au cône (plus précisément au système: cône, cellule bipolaire, ganglion). Cette impulsion parvient au récepteur de l'écorce cérébrale.

e) Lorsque les photons affluent continuellement dans la cellule ils provoquent une série d'impulsions successives; le nombre d'impulsions par seconde (fréquence) détermine le niveau de la sensation visuelle.

f) Les cônes contiennent trois genres de substances réagissantes qui se décomposent sous l'action de la lumière et qu'on peut désigner par les lettres r, g, b.

g) Lorsqu'un photon rencontre une molécule d'une substance réagissante quelconque, la dissociation peut ou peut ne pas avoir lieu. La probabilité d'une dissociation de la molécule provoquée par un photon d'une longueur d'onde λ peut être respectivement désignée par $p_r^\lambda, p_g^\lambda, p_b^\lambda$; les valeurs maxima de ces trois probabilités correspondent à des longueurs d'ondes différentes.

h) Etant donné que la rétine possède trois genres de substances réagissantes dont les propriétés sont différentes le récepteur du rayonnement ne peut jamais être considéré comme unique; en réalité, l'énergie est en quelque sorte captée par trois récepteurs indépendants qui se conduisent différemment quant à la dissociation des substances réagissantes.

i) Parallèlement à la dissociation des molécules des substances réagissantes celles-ci sont reconstituées par des ions négatifs du reconstituant (probablement de la vitamine A) fournis à l'épithélium pigmentaire par le réseau capillaire de la paroi vasculaire; sous l'action de la force d'attraction des ions positifs ces ions négatifs pénètrent à travers la paroi de la cellule

et neutralisent les ions positifs. Par suite d'une action prolongée d'un afflux continu de photons la concentration (nombre de molécules) de la substance réagissante diminue et atteint un niveau stable, caractérisé par un certain équilibre statistique: le nombre des molécules dissociées étant égal pour chaque seconde à celui des molécules reconstituées; c'est là le processus d'adaptation.

j) On peut établir un rapport quantitatif entre le nombre de photons pénétrant dans un cône par seconde et la concentration de n'importe quelle substance réagissante pour une adaptation accomplie aux conditions données.

k) La connaissance de l'allure indépendante du processus de dissociation des molécules de tous les trois genres de substances réagissantes permet, dans n'importe quelles conditions de l'action du rayonnement sur l'analyseur visuel, l'évaluation quantitative de la réaction sommaire de l'analyseur qui en résulte.

En se basant sur les thèses énumérées ci-dessus et sur quelques hypothèses auxiliaires, une théorie fut élaborée touchant la transformation du flux énergétique dans la rétine. Cette théorie permet de réduire en un seul schéma les nombreux faits établis se rapportant aux phénomènes visuels. De même il a été possible de prédire un certain nombre (encore restreint à l'heure actuelle) de phénomènes qui jusqu'à présent n'avaient pas encore été observés et de constater expérimentalement leur existence. Des constatations contradictoires entre les déductions théoriques, d'une part, et les faits rigoureusement établis, d'autre part, n'ont pas encore été découvertes.

4. En introduisant la notion du flux lumineux, de la luminance etc. la technique de l'éclairage se pose comme but de caractériser **objectivement** le flux énergétique en lui attribuant, toutefois, une valeur quantitative en tenant compte des propriétés sélectives du récepteur.

Pour établir les coefficients par lesquels il faut, dans ce but, multiplier les puissances des composantes monochromatiques du rayonnement on détermine la fonction de l'efficacité visuelle relative qui, suivant cette conception, doit exprimer la sélectivité du récepteur.

Plusieurs méthodes ont été appliquées pour la détermination de cette fonction, mais ces méthodes ont toutes ceci en commun

qu'elles utilisent, sous différentes formes, le principe photométrique. En d'autres termes deux flux énergétiques de longueurs d'ondes différentes sont considérés comme équivalents si les champs photométriques contigus ou consécutifs qu'ils forment provoquent la même **sensation** de luminance (même luminosité) c'est-à-dire la même **réaction** sommaire de l'analyseur visuel.

Si le récepteur périphérique de l'analyseur visuel avait les propriétés d'un récepteur unique, quoique variable par suite du procès de l'adaptation, on ne saurait s'opposer au principe photométrique appliqué dans le but de rechercher la fonction de l'efficacité visuelle relative. Mais le récepteur de l'œil — la rétine — n'est pas un récepteur unique, comme on le suppose généralement, mais se compose, pour ainsi dire, de trois récepteurs réunis, lesquels sous l'action de la radiation monochromatique d'une longueur d'onde λ_1 se conduisent chacun différemment et d'une tout autre façon que sous l'action d'une radiation d'une longueur d'onde λ_2 . Par conséquent, l'application du principe de l'égalité des réactions pour l'évaluation de l'équivalence objective de deux radiations par rapport à un récepteur sélectif complexe devient inadmissible. En s'appuyant sur ce principe il est impossible de résoudre le problème de la recherche de facteurs qui ne tiennent compte que des propriétés sélectives du récepteur oculaire **et non de sa réaction** et qui déterminent le « poids » des radiations monochromatiques par rapport à leur action possible sur le récepteur.

La définition donnée par la CIE établit la notion du flux lumineux en tant que flux énergétique évalué par la sensation visuelle. Dans cette définition on a confondu deux catégories de notions complètement différentes, à savoir: le flux énergétique **objectif** qui peut agir sur le récepteur doté de propriétés sélectives, et la réaction **subjective** de ce récepteur vivant. De là les erreurs de la méthode de détermination de la fonction V_λ .

Ce n'est que par une distinction plus nette des deux notions: le flux lumineux existant objectivement, nonobstant que sa définition quantitative reste conventionnelle, d'une part et, d'autre part, la réaction subjective de l'analyseur visuel qu'on peut arriver à déterminer les vraies valeurs de l'efficacité visuelle des radiations. Autrement dit, il est indispensable de distinguer nettement le flux **lumineux** (F) ou la **luminance** (B) en tant que valeur objective liée à la puissance de radiation et à la sélecti-

vité du récepteur et la **luminosité** caractérisée par la fréquence des impulsions générées dans les fibres du nerf optique en tant que grandeur subjective reliée à la **sensation** de la luminance.

Il est évident que la luminosité est fonction de la luminance, mais leur relation n'est pas simple, car elle se modifie avec la grandeur de la luminance, la composition spectrale du rayonnement et le temps d'adaptation.

Toutefois, les propriétés sélectives de la rétine ne peuvent être définitivement établies qu'après la détermination d'une nouvelle fonction de l'efficacité visuelle. Cette dernière ne peut à l'heure actuelle être obtenue autrement que par l'intermédiaire de la sensation visuelle, c'est-à-dire de la réaction visuelle de l'analyseur. Il faut donc avant tout éliminer les différentes modifications de concentration de chacune des substances réagissantes qui interviennent inévitablement au cours du procès d'adaptation de la rétine à une radiation quelconque. On peut y arriver en appliquant la méthode (proposée par S. I. Vavilov) de détermination des seuils de visibilité d'éclaircissements instantanés (0,001—0,005 sec.) relatifs aux radiations monochromatiques de différentes longueurs d'ondes.

La méthode des seuils instantanés a fait ses preuves et a donné de bons résultats. Mais la fonction du facteur de visibilité V_{λ}° qu'on obtient expérimentalement ne donne pas encore de point d'appui au calcul du flux lumineux d'après la composition spectrale du rayonnement. La fonction obtenue subit avant tout l'influence des valeurs individuelles des concentrations relatives des trois substances réagissantes dans les cônes. La fonction (V_{λ}°) ne donne directement la fonction recherchée (U_{λ}°) qu'en cas d'égalité des concentrations r, g, b, des substances réagissantes chez la personne soumise à l'expérience.

Or il est indispensable de tenir compte du fait que dans la majeure partie des cas les concentrations des substances réagissantes peuvent ne pas être égales. Il faut alors établir pour chaque individu les valeurs t_g , t_b , c'est-à-dire les rapports entre les concentrations des susdites substances g et b et celle de la substance réagissante r, après quoi cette théorie permet de calculer U_{λ}° à partir de V_{λ}° .

5. Au cours de la détermination de la fonction CIE (V) on a constaté des différences très nettes entre les fonctions indivi-

duelles obtenues pour des personnes différentes. Il est d'usage de donner pour chaque longueur d'onde les moyennes des grandeurs V_{λ} obtenues sur chaque cas individuel et d'établir ainsi la fonction V_{λ} pour l'œil «moyen international». Mais cette manipulation ne fait qu'introduire une objectivité fictive sans résoudre toutefois le problème de la caractéristique objective de la radiation monochromatique dans son action potentielle sur l'analyseur visuel. Les différences entre les fonctions individuelles V_{λ}° se maintiennent également lorsqu'on applique la méthode des seuils instantanés, quoiqu'elles soient de beaucoup moins prononcées qu'en cas de la détermination de V_{λ} par la méthode photométrique. Comme il a été dit plus haut, ces différences sont inévitables lorsque $t_g \neq 1$, $t_b \neq 1$.

Mais le calcul de la fonction U_{λ}° basé sur la détermination des valeurs de t_g et t_b ne donnera pas encore la fonction cherchée libre de toutes variations individuelles.

Pour obtenir la fonction $(U_{\lambda}^{\circ})_{\text{norm}}$, qui serait la même (dans les limites de la précision des mesures) pour tous les hommes et permettrait de calculer les valeurs objectives des flux lumineux, de la luminance etc. tout en fixant les propriétés sélectives du récepteur, il faut encore tenir compte de la transmission des médiums oculaires qui diffèrent selon les longueurs d'ondes.

L'effet de la transmission différentielle spectrale des médiums oculaires est le même qu'aurait produit un filtre placé devant les yeux à travers lequel ils seraient obligés de voir le monde extérieur. Si tous les hommes avaient des «filtres» rigoureusement identiques, ces derniers auraient en quelque sorte introduit une correction constante (pour chaque λ) dans les caractéristiques de la sélectivité du récepteur; alors les grandeurs U_{λ}° obtenues à partir des mesures effectuées sur des individus différents, auraient été suffisamment rapprochées les unes des autres. Mais les yeux des hommes n'ont très probablement pas la même transmission spectrale, ce qui attira l'attention de Mme E. N. Ioustov en rapport avec les anomalies de la vision chromatique, et rendent inévitables les différences dans les fonctions U_{λ}° calculées.

On peut cependant choisir un groupe assez nombreux de trichromates chez lesquels l'allure de la transmission spectrale

(τ_λ) soit à peu près la même (les valeurs absolues τ_λ ne jouant qu'un rôle minime; il suffit, et ceci est important, que le rapport $\tau_{\lambda_1} / \tau_{\lambda_2}$ pour deux longueurs d'ondes λ_1 et λ_2 reste le même pour toutes les personnes choisies). La méthode employée au cours des essais est basée sur l'application (sous forme élargie) du procédé de composition des équations de Rayleigh. Après avoir choisi un assez grand nombre d'individus ayant à peu près la même allure de la transmission spectrale, cette allure de la fonction (τ_λ^0) commune pour le groupe en entier peut être prise comme norme sans préciser les valeurs absolues de la fonction τ_λ^0 .

En soumettant la personne pour laquelle on avait déterminé la fonction V_λ^0 et calculé la fonction U_λ^0 à la même expérience (c'est-à-dire en composant pour elle les équations de Rayleigh correspondantes) on peut trouver le rapport $r_\lambda / \tau_\lambda^0$ pour toutes les longueurs d'ondes. Il en résulte:

$$(U_\lambda^0)_{\text{norm.}} = C U_\lambda^0 \frac{\tau_\lambda^0}{\tau_\lambda}$$

Le facteur constant C doit être choisi de telle sorte que la valeur maximum de $(U_\lambda^0)_{\text{norm.}}$ soit égale à 1.

6. En se basant sur ce qui précède on peut définitivement résoudre le problème de la photométrie des champs hétérochromes, problème discuté depuis longtemps sans qu'on ait abouti à un accord final.

Plus de 200 ans se sont écoulés depuis que P. Bouguer a établi les principes de la photométrie qui, dans l'ensemble, se sont conservés jusqu'à nos jours. A cette époque il n'existait presque encore de données sur le fonctionnement de l'analyseur visuel et Bouguer avait parfaitement raison lorsqu'il écrivait: « . . . nous laisserons de côté tout ce qui se rapporte à la métaphysique des sensations et tout en nous contentant de la mise en évidence des rapports qui existent entre ces causes extérieures et fortuites nous ne penserons qu'à la mesure de ces rapports ». (Bouguer P. Traité d'optique, sur la gradation de la lumière, p. 16, cité d'après la traduction en langue russe, édition de l'Académie des Sciences de l'URSS, 1950).

Mais pour «mesurer les rapports existant entre les causes extérieures» il faut avoir recours au jugement de l'analyseur visuel, c'est-à-dire qu'il faut établir l'égalité des sensations visuelles provenant de deux champs contigus. Par conséquent, l'hypothèse que l'égalité des sensations (précisément des sensations de luminance) correspond à l'égalité des causes objectives qui provoquent ces sensations devint la base des mesures photométriques.

Mais le schéma primitif de Bouguer rattaché pratiquement à la présence d'un seul type de composition spectrale de rayonnement des sources lumineuses qui lui était accessibles, a depuis longtemps cessé d'être juste. Il est devenu nécessaire de tenir compte de cette «métaphysique de sensations» jadis rejetée avec raison par Bouguer.

Or les données manquaient encore pour pénétrer cette «métaphysique» et les problèmes se rattachant aux phénomènes des sensations visuelles paraissaient à tel point compliqués que presque personne n'osait les aborder sérieusement.

Sans autre fondement que la difficulté d'analyser les lois des sensations visuelles, on supposa que deux sensations — de la luminance et de la chromaticité pouvaient être perçues indépendamment l'une de l'autre, qu'une certaine différence de luminance n'avait pas d'influence sur les sensations chromatiques et vice versa — que les différences de chromaticité n'influençaient pas la sensation spéciale de luminance. Alors que la pratique de la photométrie n'avait pas trait à des différences appréciables de chromaticité des champs, cette hypothèse n'entraînait pas d'inconvénients trop graves. Si la différence de chromaticité devenait plus nette (lorsqu'on comparait par exemple la lampe à incandescence à l'étalon de Heffner) on rapprochait à l'aide d'un filtre la chromaticité d'un champ à celle de l'autre, après quoi on considérait que toutes les mesures nécessaires avaient été prises pour obtenir des résultats, considérés alors comme exacts.

Mais au fur et à mesure que surgissaient d'autres problèmes (mesure des lampes à décharge à cathode incandescente et à luminescence, transmissions de différents filtres etc.) les difficultés rencontrées en photométrie augmentaient continuellement ainsi que les doutes quant à l'exactitude des résultats obtenus par des méthodes différentes.

Etablir la valeur la plus fondamentale de la technique de l'éclairage — celle du flux lumineux, exhiber la photométrie de l'impasse dans laquelle elle s'est trouvée, en finir avec la situation équivoque en matière de colorimétrie qui, d'une part, affirme l'invariabilité de la couleur, son indépendance de la luminance et, d'autre part, établit expérimentalement précisément la variabilité de la sensation chromatique en fonction soit de la luminance (phénomène de Bezold-Brücke), soit du temps (la soi-disant «décoloration des couleurs»), tout cela, et beaucoup d'autres choses encore ne peuvent être atteintes qu'en rejetant les préjugés routiniers et l'appréhension de la «métaphysique» des sensations.

Il est encore impossible à l'heure actuelle de suivre tout «le processus de la transformation de l'action extérieure en un fait de la conscience», comme l'écrivait V. I. Lénine. C'est là la tâche future des physiologues et des psychologues et non celle des éclairagistes. Mais il est possible dès maintenant, grâce à de nombreux faits déjà accumulés, de déterminer les principes et le cours de la transformation de l'énergie lumineuse qui, pénétrant de l'extérieur dans l'oeil et touchant les cellules réagissantes à la lumière de la rétine, se transforme en une énergie spécifique, d'un autre genre qui agit dans les voies nerveuses de l'analyseur visuel.

Cela suffit pour créer une base solide et indispensable en matière de technique de l'éclairage en général et spécialement en photométrie afin de résoudre convenablement le problème de la mesure des champs hétérochromes.

C'est là une tâche difficile certes, mais qui peut être accomplie en s'y prenant sérieusement. Elle exigera un travail expérimental d'une grande ampleur qui consistera à réviser les anciennes grandeurs et à déterminer des grandeurs nouvelles qui n'ont pas encore été introduites.

La théorie de la transformation du flux énergétique dans la rétine permet d'établir, contrairement aux opinions qui se sont enracinées par le temps, que l'égalité des luminosités (sensations de luminance) qui apparaît en présence de deux champs contigus ou consécutifs à caractéristiques chromatiques différentes ou l'absence de papillotement ne peuvent être considérés en tant qu'indices de l'égalité de luminance (conçue en tant que caracté-

téristique objective, quoique conventionnelle) des sources de lumière.

Autrement dit, la comparaison directe des champs à caractéristiques chromatiques différentes est inadmissible car elle conduit à des erreurs systématiques dont l'importance et le sens sont difficiles à établir a priori.

Par conséquent, on ne peut procéder à la comparaison photométrique de deux champs qu'à chromaticité autant que possible égale, par exemple, à l'aide d'un photocolorimètre quelconque.

Toutefois, il est indispensable de tenir compte du fait que même une égalisation très soignée de la chromaticité des champs n'est pas une garantie quant aux résultats non concordants obtenus par des personnes ou des laboratoires différents.

En effet pour des allures différentes de la transmission spectrale des mediums oculaires τ_λ l'égalisation des chromaticités par deux observateurs peut s'effectuer dans des conditions différentes. Dans ce cas ce n'est pas seulement l'identité des caractéristiques chromatiques qui joue un rôle, mais aussi la composition spectrale des rayonnements comparés.

L'élimination des dissemblances lors de la mise au point de l'égalité chromatique peut être effectuée par les photométristes ayant constaté des déviations de leur propre transmission τ_λ par rapport aux valeurs normales τ_λ^0 à l'aide de filtres choisis de sorte à ramener la transmission spectrale sommaire de leurs mediums oculaires et des filtres à la norme τ_λ^0 . Sous une forme simplifiée cette méthode fut jadis proposée par H. E. Ives et fut appliquée dans un certain nombre de laboratoires. Dans ce cas il devient possible d'obtenir des résultats de mesure concordants par des observateurs différents.

7. La modification appréciable de la fonction V_λ CIE et son remplacement par une fonction nouvelle (U_λ^0) se fera sentir sur les calculs colorimétriques en ce sens qu'il faudra recalculer à nouveau les tableaux des valeurs $\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda$ donc également x_λ, y_λ . Ceci est évident pour le coefficient de distribution conventionnel de luminance y_λ ; et si y_λ change les autres coefficients $\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda$ ne peuvent rester les mêmes. Cependant cela n'épuise pas les déductions qui doivent être tirées de la théorie de la transformation en ce qui concerne la science de la colorimétrie.

Il existe depuis longtemps une contradiction évidente quoique volontairement non accentuée, entre deux thèses de la colorimétrie. La première affirme que les coordonnées trichromatiques du rayonnement ne dépendent ni de la luminance ni du temps d'adaptation. La seconde est généralement formulée de telle façon que la tonalité des couleurs spectrales dépend de la luminance (phénomène de Bezold-Brücke) et du temps d'adaptation à la couleur donnée (phénomène de «décoloration des couleurs»).

De plus il existe le phénomène du contraste successif qui consiste en ce que la tonalité et la saturation d'une certaine couleur peuvent sensiblement se modifier par suite d'une adaptation préalable à une autre couleur.

Les contradictions qui apparaissent ici proviennent d'un entremêlement des valeurs objectives et subjectives comme dans le cas de la luminance et la luminosité.

La mesure de la couleur à l'aide d'un colorimètre (par un observateur trichromate avec $\tau_\lambda = \tau'_\lambda$) donne une caractéristique objective de la **couleur du rayonnement** mais non pas de la **sensation de la couleur**. En effet, par suite d'une identité complète des allures de l'adaptation dans les deux moitiés du champ du colorimètre visuel, l'identité établie des sensations de la couleur et de la luminosité ne peut changer ni avec le changement de luminance ni avec le temps quelles que soient les variations survenues de la sensation de la couleur.

D'autre part l'analyse de la composition spectrale du rayonnement coutumière au physicien n'est pas réalisable par la rétine. Par contre cette dernière est en mesure d'effectuer l'analyse de la composition d'un rayonnement par des moyens très imparfaits du point de vue de la physique mais très utiles pour l'organisme; cette analyse a pour base la sélectivité différente des trois types **r, g, b** des substances réagissantes. En agissant sur la rétine la luminance B (ou le flux lumineux) se divise pour ainsi dire en trois composantes B_r, B_g, B_b qui, potentiellement, sont capables d'effectuer une dissociation des molécules desdites substances **r, g, b** chacune séparément à l'exclusion des autres. La vitesse résultante de la dissociation des molécules de chacune de ces substances réagissantes dépend de leur concentration respective; la sensation de la couleur change donc toujours avec la luminance B et avec le temps de son action, mais chacune des vitesses de dissociation est déterminée, en

premier lieu, par les grandeurs correspondantes B_r , B_g ou B_b .

Comme la possibilité de découvrir les modifications de la sensation de la couleur en se servant de la méthode colorimétrique est exclue, étant donné l'identité des conditions d'adaptation, le seul résultat des mesures consiste dans la détermination de la décomposition $B = B_r + B_g + B_b$ de la luminance qui assure dans les deux champs le même cours d'adaptation dans le temps ainsi que son régime définitif.

Il existe cependant une possibilité expérimentalement vérifiée de modifier la méthode colorimétrique de façon à pouvoir s'en servir pour découvrir et mesurer les modifications des sensations de la couleur (Thèses de M-me N. S. Ivanov).

8. Etant donné que les valeurs absolues B et par conséquent B_r , B_g , B_b n'ont pas d'influence sur la chromaticité du rayonnement, cette chromaticité peut être caractérisée par les rapports.

$m_g = \frac{B_g}{B_r}$ et $m_b = \frac{B_b}{B_r}$. Pour des radiations monochromatique on

aura:

$$m_g^\lambda = \frac{B_g^\lambda}{B_r^\lambda} = \frac{P_g^\lambda}{P_r^\lambda} \quad \text{et} \quad m_b^\lambda = \frac{B_b^\lambda}{B_r^\lambda} = \frac{P_b^\lambda}{P_r^\lambda}$$

Par conséquent la fonction U_λ° peut être représentée comme la somme des trois fonctions particulières se rapportant aux substances réagissantes prises séparément.

$$U_\lambda^\circ = U_\lambda^r + U_\lambda^g + U_\lambda^b = \frac{U_\lambda^r}{1 + m_g^\lambda + m_b^\lambda} + \frac{U_\lambda^g + m_g^\lambda U_\lambda^r}{1 + m_g^\lambda + m_b^\lambda} + \frac{U_\lambda^b + m_b^\lambda U_\lambda^r}{1 + m_g^\lambda + m_b^\lambda}$$

Chacune des composantes de la luminance produit sa fréquence d'impulsion ν_r , ν_g , ν_b , en conséquence de la dissociation des molécules de la substance réagissante respective, et on peut admettre pour caractéristiques de la sensation de la couleur qui se forme les rapports:

$$\nu_g = \frac{\nu_g}{\nu_r} \quad \text{et} \quad \nu_b = \frac{\nu_b}{\nu_r}$$

Etant donné que ν_r , ν_g , ν_b se modifient avec la modification correspondante de B_r , B_g , B_b et, comme règle générale, diffé-

remment, ν_g, ν_b changent leur valeur avec la modification de B et (phénomène généralisé de Bezold-Brücke). De plus la diminution de la concentration des substances réagissantes n'a pas lieu immédiatement après le début de l'action de la lumière; un certain temps est nécessaire à l'accomplissement du processus d'adaptation (2 à 3 min. pour les faibles luminances). La sensation de la couleur doit donc se modifier au cours de l'adaptation avec les changements de ν_r, ν_g, ν_b (phénomène de «décoloration» de la couleur).

Il est possible de calculer les grandeurs ν_g, ν_b pour une luminance arbitraire B et pour le temps t du procès en partant des valeurs données m_g, m_b et d'établir ainsi approximativement l'allure des modifications ν_g, ν_b au cours du temps de l'adaptation.

A l'heure actuelle on ne sait pas encore comment le centre visuel établit les relations entre les sensations et les rapports des

fréquences d'impulsions $\frac{\nu_g}{\nu_r}$ et $\frac{\nu_b}{\nu_r}$.

Si la rétine est adaptée à un certain rayonnement (B, m_g, m_b) et subit ensuite l'action d'un rayonnement (B', m'_g, m'_b) on peut, en partant des rapports déduits de la théorie, calculer les grandeurs ν'_g, ν'_b qui déterminent la sensation de la couleur à des moments différents à partir du début de l'action du rayonnement (B', m'_g, m'_b). Il est donc possible, en principe, de calculer les phénomènes du contraste successif.

D'autre part il existe la possibilité de calculer les corrélations pour le soi-disant contraste simultané. Ce phénomène n'existe probablement pas en tant que phénomène indépendant et peut être considéré comme résultat des micro- et macro-mouvements involontaires de l'oeil.

9. La théorie de la transformation du flux énergétique dans la rétine permet de traiter d'une manière nouvelle la question de la «distance» entre deux couleurs ainsi que celle des seuils différentiels de deux chromaticités. Cette question, rapportée par certains spécialistes à une métrique spéciale «supérieure» de la couleur est depuis longtemps étudiée; cependant non seulement elle n'a pas été résolue définitivement mais, au contraire, on pourrait dire qu'elle s'embrouille de plus en plus avec chaque nouvelle étude qui paraît.

Dans la pratique, ce problème se résout facilement en représentant les chromaticités sur un genre spécial de diagramme à seuil chromatique constant. Presque tous les diagrammes à seuils chromatiques constants qui ont été proposés sont établis sur la base de la transformation linéaire des diagrammes chromatiques usuels, c'est-à-dire en admettant la notion simplifiée des particularités des seuils chromatiques à luminance constante (d'après D. Djudd par exemple).

Toutefois, on sait depuis longtemps que si la méthode de l'établissement des diagrammes à seuils chromatiques constants donne en pratique des résultats plus ou moins valables (à défaut d'une meilleure méthode), il est néanmoins impossible de la faire concorder avec les données sur les seuils différentiels des chromaticités obtenues par la voie expérimentale si l'on ne renonce pas à la transformation linéaire du diagramme usuel.

Sans s'arrêter ici sur l'analyse de la conception admise actuellement en ce qui concerne la question des seuils différentiels des chromaticités on peut en venir au traitement du problème qui découle de la théorie de la transformation.

Si l'on a une certaine chromaticité du rayonnement caractérisée par les valeurs m_g , m_b , sa modification est déterminée par une modification correspondante de l'un des deux rapports chromatiques $\pm \Delta m_g$, $\pm \Delta m_b$ ou des deux ensemble. A la chromaticité du rayonnement (m_g, m_b) et à une certaine luminance B correspondent: une sensation de la couleur qui est déterminée par

les rapports $\nu_g = \frac{\gamma_g}{\gamma_r}$, $\nu_b = \frac{\gamma_b}{\gamma_r}$ d'une part et une luminosité

ν d'autre part.

La modification de m_g d'une valeur $\pm \Delta m_g$ et m_b d'une valeur $\pm \Delta m_b$ sans changement de la luminance B entraîne en général la modification de ν_g, ν_b , car $\gamma_r, \gamma_d, \gamma_b$ recevront des valeurs nouvelles. Mais en même temps sera modifiée la luminosité ν .

Pour simplifier on peut supposer que la luminance de la couleur modifiée sera choisie de telle sorte que ν reste constant. D'autre part on doit supposer que l'adaptation reste également invariable, c'est-à-dire que les **concentrations des substances réagissantes restent les mêmes que pendant l'action de la couleur initiale.**

On peut alors démontrer que:

$$\frac{\Delta p_g}{p_g} = \frac{1}{1 + m_g + m_b} \cdot \frac{\Delta m_g}{m_g} = \frac{\Delta \nu_g}{\nu_g} + \frac{\Delta \nu_r}{\nu_r};$$

$$\frac{\Delta p_b}{p_b} = \frac{1}{1 + m_g + m_b} \cdot \frac{\Delta m_b}{m_b} = \frac{\Delta \nu_b}{\nu_b} + \frac{\Delta \nu_r}{\nu_r}.$$

Si les fréquences des impulsions ν_r , ν_g et ν_b restaient exactement constantes on aurait pu s'attendre dans le cas où les valeurs $\Delta \nu_r$, $\Delta \nu_g$, $\Delta \nu_b$ auraient été très faibles à ce que la possibilité de l'analyseur visuel d'apercevoir la modification de chromaticité ne soit déterminée que par la finesse de distinction des rapports de fréquences par le récepteur dans le centre visuel.

Mais en réalité, comme le montrent les oscillogrammes pris sur les fibres du nerf optique des animaux vivants, les fréquences d'impulsions sont soumises à des fluctuations qui augmentent d'autant plus que la fréquence décroît.

Tandis que $\Delta \nu_r$, $\Delta \nu_g$, $\Delta \nu_b$ restent inférieurs aux grandeurs moyennes de fluctuation des fréquences ν_r , ν_g , ν_b l'analyseur ne distinguera aucune modification de la sensation de la couleur. Et ce n'est que lorsque l'une des grandeurs $\Delta \nu_r$, $\Delta \nu_g$ ou $\Delta \nu_b$ atteindra une valeur égale ou légèrement supérieure à la grandeur moyenne des fluctuations de fréquence correspondante que la différence entre la chromaticité initiale et la chromaticité modifiée atteindra la valeur des seuils et pourra être saisie. Autrement dit, les fluctuations des fréquences ν_r , ν_g , ν_b déterminent les limites des modifications m_g , m_b (ou p_g , p_b) dans lesquelles l'analyseur ne peut distinguer aucune variation de la chromaticité.

Ainsi les seuils différentiels chromatiques obtiennent un sens physique déterminé et avec cela, si toutes les chromaticités possibles de rayonnement représentent un ensemble infini à deux dimensions, toutes les sensations de la chromaticité possibles forment un ensemble fini quoique le nombre de ses membres peut être très élevé.

Sans entrer dans les détails il suffit de signaler qu'il y a là une possibilité de simplifier considérablement la méthode expérimentale de détermination des seuils différentiels chromatiques par rapport à ce qu'exigeait la conception qui était admise jusqu'à présent. La recherche de la «distance» entre deux chroma-

ticités se trouve de même très nettement modifiée et simplifiée sans qu'on soit obligé d'avoir recours à la géométrie non-euclidienne.

10. Si la luminance caractérise objectivement une source primaire ou secondaire relativement à la possibilité potentielle de créer un processus subjectif ayant cours dans l'organisme, la fréquence des impulsions ν détermine la luminosité ayant trait à la sensation visuelle naissante. Ce serait une résolution du problème incomplète de ne pouvoir que calculer et mesurer la luminance sans être capable de déterminer la grandeur de la luminosité pour une luminance donnée.

Le problème de la détermination de la luminosité peut être posé de deux façons différentes: il serait désirable: primo — de savoir la calculer à une certaine approximation et, secundo — de mesurer la fréquence des impulsions chez l'homme dans des conditions différentes d'illumination sans nuire à sa santé.

La première question est théoriquement résolue car la théorie de transformation donne la possibilité de calculer, pour un processus visuel stationnaire, le nombre de ions négatifs (L) qui parviennent jusqu'au premier synapse pendant une seconde. Comme première approximation on peut estimer que la fréquence des impulsions est proportionnelle à ce nombre (L). Il est probable qu'une correction devra être introduite par la suite due aux réactions chimiques lesquelles ont été laissées de côté afin de ne pas trop compliquer le problème.

Mais pour réaliser ce calcul il est indispensable d'effectuer un travail difficile de la détermination de quatre paramètres constants de deux types: communs à tous les hommes (m , m_0) et individuels (t_g , t_b). En plus, il faut déterminer pour chaque personne un paramètre variable (u) la grandeur duquel dépend aussi bien de la luminance (ou luminosité) que du comportement du système nerveux de la personne soumise à l'expérience. La méthode de détermination de tous les cinq paramètres a été élaborée et éprouvée.

Toutefois, il ne faut pas oublier que le calcul s'effectue pour un récepteur vivant dont la réaction est liée non seulement à une cause agissant de l'extérieur (luminance) mais aussi à l'état de l'organisme et au comportement du système nerveux. Dans des conditions extérieures parfaitement identiques, mais à des moments différents, on peut observer chez le même individu des

différences (dans de certaines limites) de réaction suivant l'état de santé, l'humeur et le degré de fatigue.

C'est pour cette raison que le problème du calcul de ν ou de L peut consister non pas dans la détermination des valeurs absolues de ces facteurs, la luminance étant fixe, mais dans l'établissement de l'allure de leur dépendance de la luminance (B) et de la chromaticité du rayonnement (m_g, m_b) qui agit sur la rétine ayant des paramètres donnés t_g, t_b ainsi que le paramètre u déterminé pour ce cas particulier. Même un tel calcul, bien que limité dans ses possibilités, est très utile pour comprendre les phénomènes visuels et pour résoudre les problèmes posés par la pratique en technique de l'éclairage.

Mais il existe une possibilité de déterminer la fréquence effective (moyenne) ν des impulsions dans les fibres du nerf optique de l'homme sans nuire à sa santé, ce qui se produit lorsqu'on opère sur des animaux vivants. Evidemment, cette méthode est indirecte; elle est basée sur les déductions tirées de la théorie de transformation du flux énergétique dans la rétine.

La théorie de la transformation dans la rétine qui veut que le processus visuel prenne départ dans la dissociation des molécules des substances réagissantes lors de leur rencontre avec les photons, conduit inévitablement à la conclusion que ce processus ne peut être conçu que par la méthode statistique, c'est-à-dire qu'il est soumis aux lois de la probabilité. En analysant les probabilités de la dissociation des molécules des substances réagissantes dans les conditions d'un flux continu de photons pénétrants dans chaque cône, d'une part, et d'un flux intermittent d'une certaine fréquence, d'autre part, il fut possible de faire une déduction suivante très importante. Si la luminance qui engendre le flux continu de photons égale B tandis que la luminance du flux intermittent égale $2B$, les périodes d'obscurité et de lumière étant les mêmes, l'œil observe un papillotement désagréable de la lumière. Ce phénomène a lieu tant que la fréquence d'intermittence obscurité — lumière reste faible. Mais lorsque celle-ci atteint la fréquence moyenne des impulsions le papillotement provoqué par la luminance disparaît (fréquence de fusion des images intermittentes), ce qui correspond à une identité complète quant à la statistique de l'allure de la dissociation des molécules des substances réagissantes pour le flux continu comme pour le flux intermittent de photons.

Sans parler du fait qu'il y a là une nouvelle explication du phénomène de la fréquence de la fusion des images qu'on avait essayé d'expliquer par la «conservation de sensations intermittentes visuelles» ou en se rapportant même à la «mémoire visuelle», la nouvelle conception du phénomène permet de déterminer la fréquence moyenne des impulsions dans des conditions différentes (dans de larges limites), c'est-à-dire pour des valeurs B , m_g , m_b différentes.

Les expériences qui ont été réalisées à l'Institut de la technique de l'éclairage par Mme R. L. Folb sur la détermination de la fréquence des impulsions pour des variations de luminance allant d'environ 1,0 jusqu'à des dizaines de mille nit avec des compositions spectrales de rayonnement très différentes ont donné une concordance qualitative complète avec les grandeurs L calculées suivant la théorie de transformation. Pour les raisons exposées ci-dessus, il était impossible de s'attendre à une concordance quantitative.

Il devient maintenant possible de déterminer la fréquence moyenne d'impulsions chez un ouvrier à son poste de travail exactement dans les mêmes conditions d'adaptation et d'éclairage qui l'entourent pendant son activité (l'appareil correspondant est en voie de construction); il est également possible de déterminer la réaction de son analyseur visuel dans telles ou telles autres conditions d'éclairage.

11. La théorie de la transformation et l'expérience montrent qu'avec l'augmentation de la luminance la fréquence d'impulsions croît rapidement au bas niveau de la luminance, puis de plus en plus lentement. A un niveau de luminance de l'ordre de $3-4 \cdot 10^3$ nit il faut, pour que ν augmente de 1%, accroître la luminance (à composition spectrale du rayonnement correspondante à la source A) d'environ 30 à 40%, la fréquence des impulsions atteignant la valeur finale de 60—70 hertz. Avec l'augmentation de ν la fluctuation de fréquence diminue, le processus visuel devient plus stable et l'acuité visuelle ainsi que la vitesse de distinction augmentent.

Une grande stabilité du rythme des impulsions est la condition fondamentale pour une bonne perception d'objets de petites dimensions angulaires sans fatigue ni tension nerveuse. Par conséquent, et afin d'assurer des conditions favorables au cours du travail, surtout lorsqu'il s'agit de distinguer les pièces

très fines, il faut créer de telles conditions d'éclairement qui correspondent à une fréquence d'impulsions autant que possible élevée.

Une particularité de la vision consiste en ce fait que le processus peut s'écouler plus ou moins bien même à des luminances qui n'assurent pas de valeurs suffisamment élevées en ν ,

Etant donné que la concentration de la substance réagissante est déterminée non seulement par le nombre de photons qui pénètrent chaque seconde dans un cône quelconque, mais aussi par le paramètre (u) qui dépend du fonctionnement du système nerveux, étant donné aussi que ce dernier agit sur le diamètre intérieur et la perméabilité des capillaires qui fournissent à l'épithélium les ions négatifs — reconstituants, l'organisme a la possibilité, à l'aide d'un effort parfois considérable (action des centres sur les secteurs correspondants du système nerveux) de maintenir la concentration de la substance réagissante à un niveau relativement élevé et de compenser, jusqu'à une certaine mesure, le manque en photons par une élévation de fréquence supérieure à celle qui correspond aux conditions d'éclairement présentes.

Toutefois, dans ces conditions le processus visuel est instable car la tension nerveuse, comme il arrive souvent, est elle-même sujette à des variations. Ce n'est que dans le cas où la fréquence d'impulsion exigée est assurée par une luminance correspondante que l'organisme se passe d'une tension nerveuse supplémentaire et que le processus de la vision suit son cours normal en maintenant la stabilité du rythme des impulsions au niveau nécessaire.

Il y a déjà longtemps qu'on a compris en technique d'éclairage qu'il était indispensable d'assurer un éclairage assez haut et par conséquent une luminance suffisante des surfaces sur lesquelles il faut distinguer tel ou tel détail; les normes d'éclairement augmentaient donc de plus en plus avec le temps.

Néanmoins, ces normes n'étaient fixées que sur les données empiriques, sur les témoignages des ouvriers, sur l'évaluation de productivité et, dans une certaine mesure, sur des données expérimentales de laboratoire concernant: l'acuité visuelle, la vitesse de distinction des détails et la stabilité de la vision claire.

Mais la nécessité d'assurer telle ou telle autre luminance ne s'appuyait pas sur des bases théoriques, tandis que, dans la pratique, le travail donnait et continue à donner des résultats

plus ou moins satisfaisants même dans les cas où les conditions d'éclairage ne sont pas conformes aux normes.

La question des normes d'éclairage dans l'industrie n'est pas simple. Presque toujours l'accroissement de l'éclairage entraîne une augmentation de la consommation d'énergie électrique, c'est-à-dire une élévation des frais qui peut se faire sentir sur le prix de revient. Il est vrai que l'augmentation de l'éclairage provoque, comme le montre l'expérience, un accroissement de la productivité et une amélioration de la qualité des produits fabriqués en diminuant le rebut. Ceci compense en grande partie les frais relatifs en courant consommé; toutefois une trop forte augmentation de l'éclairage peut être quand même désavantageuse du point de vue d'un atelier, voire même d'une usine dans son ensemble.

Mais il faut tenir compte du fait qu'en général les frais d'éclairage ne présentent qu'une partie infime du prix de revient; d'autre part, il serait peut être faux de ne prendre en considération que l'économie d'un atelier ou d'une usine. Du point de vue des intérêts de l'Etat et de la société socialiste le maintien de la santé des travailleurs et de la productivité à un niveau le plus élevé possible (et pour une durée maximum) peuvent être considérés comme des facteurs sociaux et économiques dont la signification, dans beaucoup de cas, dépasse largement les intérêts économiques d'un atelier ou d'une usine.

Cependant le travail à luminance insuffisante de la surface des pièces, machines, outils, etc. ainsi que du fond provoque une tension nerveuse systématique et un fonctionnement anormal de l'analyseur visuel qui peuvent se faire sentir très sérieusement sur la santé des ouvriers et leur productivité.

12. Comme il a été déjà dit ci-dessus la fréquence des impulsions croît d'autant plus lentement que la luminance augmente. Pour les luminances élevées le gain en ν est obtenu aux dépens d'une trop forte augmentation de luminance ce qui entraîne un accroissement considérable de la consommation en courant électrique. Il est donc parfaitement raisonnable de se demander s'il est vraiment utile de chercher un faible avantage dans la stabilité de la vision par une légère augmentation de ν acheté à un prix élevé.

La réponse à cette question ne peut être donnée qu'après avoir examiné de près les conditions de la vision au cours de

l'exécution de travaux délicats. En qualité d'exemple on peut prendre le travail à l'aiguille avec un fil gris foncé sur une étoffe de la même couleur. Admettons les coefficients de réflexion: pour l'étoffe — 15%, pour le fil — 10% et une épaisseur du fil de 0,1 mm.

D'après les règles existantes en URSS (pour des lampes à incandescence) pour les travaux de ce genre est prescrit un éclairage minimum de 500 lux qui donne une luminance de l'étoffe (fond) de 25 nit environ. A cette luminance correspond (chez une personne soumise à l'essai et choisie à tout hasard) une fréquence moyenne d'impulsion $\nu \approx 47$ Hertz.

Pour un éloignement de l'oeil de 40 cm l'épaisseur du fil est visible sous l'angle $\sim 0,8' \approx 48''$ et par conséquent son image géométrique recouvre sur la rétine deux rangées voisines de cônes. Par suite de la diffraction de la lumière à la pupille l'image du fil devient quelque peu flou. Au minimum de l'éclairage de la rétine dans cette image le flux de photons qui rentre dans un cône quelconque n'est qu'un 0,81-ème du flux qui entre dans un cône situé suffisamment loin et en dehors de l'image. Par conséquent on peut s'attendre à ce que les cônes qui se trouvent à l'endroit du flux minimum donnent naissance à une fréquence de $47 \cdot 0,81 \sim 38$ Hertz.

Si $\nu = 47$ Hertz correspond à la sensation d'une luminance de 25 nit, 38 Hertz sont obtenus, comme le démontre la courbe des rapports entre B et ν chez la personne soumise à l'expérience, pour une adaptation à une luminance de 8 nit environ.

Quoique les aberrations chromatiques et sphériques du système optique de l'oeil diminuent quelque peu les différences des sensations de luminance, le fil sera quand même visible sur le fond de l'étoffe. Cependant l'augmentation de l'éclairage jusqu'à 1000 lux recommandé en URSS par les «Règles concernant l'installation de l'éclairage par des lampes fluorescentes», donne une luminance de l'étoffe de 50 nit à laquelle correspond une fréquence $\nu \approx 50$ Hertz. Dans le minimum de l'image de diffraction $\nu \approx 40$ Hertz qui à l'adaptation correspondent à une luminance de 9—10 nit. Il est évident qu'on obtient un avantage important quant à la visibilité du fil car le contraste entre le fil et l'étoffe est plus grand.

En poussant l'éclairage jusqu'à 2000 lux la luminance atteint ≈ 100 nit avec $\nu \approx 53$ Hertz du fond et 45 Hertz du

minimum de diffraction, ce qui correspond à une luminance de 13—14 nit. La visibilité du fil augmente encore.

Un éclairage de 500 lux aurait permis à la personne soumise à l'expérience de travailler, mais dans ces conditions une certaine tension visuelle est fort probable. Elle diminuera avec un éclairage de 1000 lux pour disparaître complètement avec 2000 lux.

Cet exemple a pour but de montrer qu'une faible augmentation de ν apparemment sans importance sérieuse pour le processus visuel peut donner un effet très marqué quant à la visibilité des détails sur un fond.

Evidemment cet exposé ne peut pas servir à la résolution du problème de la normalisation des éclairages industriels. Il est cependant possible de tracer une voie qui conduit à une solution fondée de cette question importante mais compliquée en utilisant les données de la théorie de la transformation du flux énergétique dans la rétine.

La résolution effective de ce problème nécessitera encore un grand travail aussi bien théorique qu'expérimental.

COMMISSION INTERNATIONALE
DE L'ECLAIRAGE

COMMUNICATION

TREIZIEME SESSION
Zurich, 13—22 juin 1955

S. G. IUROV
(U.R.S.S)

Epreuve
Reproduction interdite

MESURAGE ET CALCUL DES GRANDEURS
PHOTOMETRIQUES EQUIVALENTES

par Serge IUROV,
chargé de cours, dipl. ingénieur,
Institut de la technique de l'éclairage, Moscou

0
ILLUMINATION, INTL. COMMISSION ON (CIE) - 13th
Plenary Meeting - Zurich, 13-22 - June 5

MESURAGE ET CALCUL DES GRANDEURS PHOTOMETRIQUES EQUIVALENTES

par Serge Iurov,

Institut de la technique de l'éclairage de l'U.R.S.S. Moscou

La photométrie est une science métrologique qui étudie et effectue l'évaluation quantitative du rayonnement exprimé en unités de mesure effectives qui sont rapportées à la réaction d'un récepteur sélectif, ainsi que l'évaluation quantitative de la réponse au rayonnement du récepteur sélectif considéré.

Les mesures et les calculs des grandeurs photométriques ayant pour objet l'évaluation du rayonnement conformément aux réactions de l'«œil moyen international» constituent une branche particulière de la photométrie; les propriétés de cet œil moyen ont été définies par les fonctions de l'efficacité lumineuse relative photopique et scotopique adoptées par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) en 1924 et 1951.

Une autre branche de la photométrie théorique et appliquée est l'évaluation des réactions de l'œil dans les conditions de la vision mésopique, c. à. d. dans le domaine transitoire. On travaille à cette branche en Union Soviétique depuis 1925 env.

Une branche spéciale de la photométrie, qui pourrait être appelée «photométrie des grandeurs photométriques équivalentes» a été mise sur pied à la suite de ces travaux.

Le but du présent rapport est de donner un bref aperçu des résultats des travaux effectués dans le domaine de la photométrie des grandeurs photométriques équivalentes au laboratoire de photométrie de l'Institut de la technique de l'éclairage, à Moscou.

I

La photométrie est basée sur deux définitions fondamentales, formulées dans les travaux de plusieurs congrès de la CIE:

I) Le flux lumineux «c'est la puissance de l'énergie rayonnante évaluée d'après la sensation lumineuse qu'elle produit» . . . [1].

II) « . . . tous les résultats des mesures photométriques doivent être concordants et reposer sur une base unique et ferme, définie par l'équation

$$B = K_m \int \tilde{B}_\lambda \cdot V_\lambda \cdot d\lambda \quad (1)$$

où B est la valeur de la luminance,

K_m , valeur maxima de l'efficacité lumineuse,

\tilde{B}_λ densité spectrale de luminance,

V_λ valeurs de l'efficacité lumineuse relative, définies par la CIE,

λ —longueur d'onde . . . » [2].

La définition I est extraite de la Norme Soviétique OCT/7637. La définition II a été également inscrite dans une Norme Soviétique [3], dans laquelle se trouvent fixées les valeurs numériques de l'efficacité lumineuse relative, adoptées par la CIE en 1924.

Les définition I et II attribuent au flux lumineux* un sens différent, puisqu'elles formulent d'une façon différente le critérium d'égalité des grandeurs photométriques. Le critérium de la définition I est l'égalité des sensations lumineuses, et celui de la définition II l'égalité des intégrales calculées à partir de la fonction de l'efficacité lumineuse relative.

Il est nécessaire de savoir si on obtient les mêmes valeurs numériques pour une grandeur photométrique quelconque du rayonnement donné en partant de ces deux définitions différentes. Cette question ne présente pas seulement un intérêt théorique, elle a également une grande signification pratique, étant donné que le principe de l'égalité des sensations lumineuses continue à être largement utilisé non seulement pour les mesures photométriques des rayonnements blancs, mais aussi des rayonnements chromatiques.

Puisque l'efficacité lumineuse relative V_λ est uniquement une fonction de longueur d'onde, il s'ensuit que d'après la défini-

* Le passage de la luminance au flux lumineux se réalise à l'aide de données géométriques et ne comporte en principe aucune ambiguïté.

dition II le calcul de la valeur numérique d'une grandeur photométrique se ramène à des opérations de multiplication et d'addition. Par conséquent, les grandeurs photométriques obtenues à partir de la définition II possèdent les propriétés d'additivité (si $A = B$, on aura $nA = nB$) et de distributivité (si $A = C$ et $B = C$ on aura $mA + nB = C$ pour $m + n = 1$).

Pour déterminer si les définitions fondamentales photométriques I et II sont concordantes, il suffira de rechercher si la sensation lumineuse possède les propriétés que nous venons de signaler.

L'égalité de luminosité de deux rayonnements a lieu quand l'observateur effectuant les comparaisons des rayonnements à l'aide d'un photomètre visuel ne peut discerner le plus clair et le plus obscur de ces rayonnements.

L'égalité physiologique des luminosités peut être réduite à l'égalité des fréquences des impulsions qui parcourent les fibres nerveuses, partant des cellules sensibles à la lumière de la rétine [4].

Il est connu (phénomène Purkinje) que l'égalité des luminosités ne possède pas la propriété d'additivité dans les conditions de visibilité mésopique (correspondant à l'adaptation de l'oeil dans le domaine de niveaux situés entre 10-4 et 1 apostilb, env.). Nous avons entrepris une série d'expériences afin d'étudier la question de l'additivité de luminosités aux niveaux plus élevés d'adaptation de l'oeil correspondants à la visibilité photopique [5]. Ces expériences consistaient dans l'égalisation des luminosités des rayonnements homochromes, mais hétérospectraux. Les mesures (égalisations) des luminosités étaient effectuées à l'aide d'installations de mesure différentes à des niveaux d'adaptation variés allant de 20 à 800 asb. Six observateurs ont pris part à ces travaux; ils ont effectué plusieurs milliers de mesures au cours de sept mois. Il résulte de ces mesures que l'égalité de luminosité ne possède pas non plus de propriété d'additivité même aux niveaux d'adaptation élevés correspondant à la vision photopique. Pour conserver l'égalité de la luminosité lors du passage d'un niveau d'adaptation à un autre, la luminance énergétique des rayonnements comparés doit être modifiée dans des proportions différentes. Les différences constatées atteignaient 10 à 20%.

Ce qui vient d'être exposé montre que les suggestions faites

par W. D. Wright [6] en 1951 étaient en voie d'exécution chez nous dès 1948.

La question de savoir si l'égalité des luminosités possède la propriété de distributivité n'a été jusqu'ici ni sérieusement controversée ni étudiée systématiquement avec une précision nécessaire. Pour l'élucider nous avons également entrepris une série d'expériences [7].

Au cours de ces expériences deux rayonnements chromatiques d'abord pris séparément, puis mélangés l'un à l'autre ont été comparés et égalisés en tant que luminosité à un rayonnement blanc, à luminance énergétique constante, assurant un niveau constant d'adaptation de l'oeil de l'observateur. Plus de 2 000 mesures effectuées à des niveaux d'adaptation correspondants aux visions scotopiques et mésopiques ont été exécutées par trois observateurs. Un photomètre visuel spécial, à large champ photométrique, a été utilisé pour ces mesures. L'analyse statistique des résultats de mesures de chaque observateur montre que les discrédances de ces résultats ne peuvent être expliquées seulement par les erreurs fortuites ou celles provenant des instruments de mesure utilisés. Les résultats de mesure prouvent que l'égalité des luminosités à un niveau d'adaptation déterminé ne possède pas de propriété de distributivité. Admettons que les rayonnements A et B sont chacun séparément égaux en tant que luminosité au rayonnement C . En mélangeant ces radiations en proportion m et n on peut, en modifiant les valeurs de m et de n , obtenir un rayonnement nouveau de luminosité égal à C . Mais on constate alors que la somme $(m + n)$ diffère de l'unité jusqu'à 15% au maximum. Cela prouve que l'égalité des luminosités ne possède pas la propriété de distributivité.

Il faut constater que parmi les travaux sur la photométrie il en existe quelques-uns qui contiennent des données confirmant les résultats expérimentaux cités. Ainsi M. Jaggi [8], en mesurant à l'aide d'un photomètre à papillotement le facteur de transmission intégral de verres colorés pour des niveaux de luminance différents (variant de 3 nt à 2 000 nt), a obtenu des variations de ce facteur de transmission de 30% pour le filtre rouge et de 12 à 14% environ pour le filtre bleu.

Il faut également mentionner l'excellent ouvrage du savant allemand éminent A. Dresler [9] dans lequel se trouvent rassemblés et confrontés les résultats de recherches de différents

auteurs. La conclusion principale que l'on peut tirer de ce travail est que la sensation lumineuse n'obéit pas à la loi de l'additivité.

On n'a pu expliquer jusqu'ici ni le phénomène inverse Purkinje, ni d'autres particularités métrologiques qui différencient l'oeil réel d'un récepteur sélectif parfait. Il découle des résultats des expériences que la sensibilité spectrale de l'oeil est fonction non seulement de la longueur d'onde mais également du niveau d'adaptation de l'oeil et de la composition spectrale du rayonnement pénétrant dans l'oeil. Appelons sensibilité spectrale relative de l'oeil une fonction analogue à celle de l'efficacité lumineuse relative. La différence entre ces deux fonctions consiste dans le fait qu'à l'aide de l'efficacité lumineuse relative on peut calculer les conditions de l'égalité de deux grandeurs photométriques (cf. définition II) et la fonction q_{λ} de la sensibilité spectrale relative de l'oeil permet d'exprimer en termes mathématiques l'égalité de luminosités de deux radiations expérimentalement constatée:

$$\int \tilde{B}_{1\lambda} q_{\lambda} d\lambda = \int \tilde{B}_{2\lambda} q_{\lambda} d\lambda \quad (2)$$

Il est nécessaire d'insister sur le fait que l'efficacité lumineuse relative d'après la CIE permet de **déterminer** l'égalité des grandeurs lumineuses et la sensibilité spectrale relative de l'oeil décrit l'égalité des luminosités. Cela signifie que l'efficacité lumineuse relative peut avoir un caractère plus ou moins conventionnel, tandis que la sensibilité spectrale de l'oeil doit correspondre à des résultats de mesures déterminés. On peut signaler en passant que le rôle de l'efficacité lumineuse relative a été nettement défini dans le rapport du «Comité de la photométrie visuelle»* au X Congrès de la CIE (1939) [10]:

«Il est nécessaire de ne pas perdre de vue que l'expression (1)** a plutôt le caractère d'une définition que d'une loi physique fondamentale et ce sont surtout des considérations d'ordre pratique (p. e. le caractère «linéaire» de la luminance au sens mathématique de ce terme, la simplicité de la structure du système des unités photométriques et la simplicité des calculs qui en découle, etc.) qui la firent adopter».

* Le rapport a été présenté par le Comité National hongrois pour l'éclairage. Les rapporteurs ont été E. Ferencz, et J. Urbanek.

** Cf. définition II, p. 2.

Les expériences décrites plus haut ayant démontré que l'égalité des luminosités ne possède pas les propriétés d'additivité et de distributivité, on peut en tirer certaines conclusions importantes concernant le caractère de la sensibilité spectrale relative de l'oeil. Ecrivons l'égalité des luminosités de deux radiations à l'aide de l'expression (2). Si la puissance de la radiation \tilde{B}_1 est modifiée dans le rapport de 1 à n , il faut, pour conserver l'égalité des luminosités, modifier ainsi que le montre la pratique la puissance de la radiation \tilde{B}_2 dans le rapport de 1 à m . Il est à noter que

$$n \neq m \quad (3)$$

et que

$$n \int \tilde{B}_{1\lambda} \cdot q'_{\lambda} \cdot d\lambda = m \int \tilde{B}_{2\lambda} \cdot q'_{\lambda} \cdot d\lambda \quad (4)$$

Ici q'_{λ} est la sensibilité spectrale relative de l'oeil pour le nouveau niveau (modifié) de l'adaptation de l'oeil. De la confrontation des expressions (2) et (4) on déduit que si $n \neq m$ on obtient

$$q_{\lambda} \neq q'_{\lambda} \quad (5)$$

Par conséquent le fait que l'égalité des luminosités ne possède pas de propriétés d'additivité (l'inégalité [3] se rapporte non seulement aux niveaux d'adaptation correspondant à la vision mésopique, mais également à ceux de la vision photopique) signifie que la sensibilité spectrale de l'oeil dépend du niveau d'adaptation.

Examinons maintenant les résultats des expériences ayant démontré que l'égalité des luminosités ne possède pas de propriété de distributivité.

Supposons que les radiations \tilde{B}_1 et \tilde{B}_2 sont égales chacune, au point de vue de luminosité, au rayonnement \tilde{B}_3 . Ecrivons-le sous forme de deux équations distinctes:

$$\left. \begin{aligned} \int \tilde{B}_{1\lambda} q_{1\lambda} d\lambda &= \int \tilde{B}_{3\lambda} q_{3\lambda} d\lambda \\ \int \tilde{B}_{2\lambda} q_{2\lambda} d\lambda &= \int \tilde{B}_{3\lambda} q_{3\lambda} d\lambda \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

En mélangeant les radiations $m\tilde{B}_1$ et $n\tilde{B}_2$ ($m < 1$ et $n < 1$) on obtient un rayonnement nouveau qui, pour les valeurs numéri-

ques déterminées de m et de n , sera égal au point de vue de la luminosité au rayonnement \tilde{B}_3 .

$$m \int \tilde{B}_{1\lambda} q_{12\lambda} d\lambda + n \int \tilde{B}_{2\lambda} q_{12\lambda} d\lambda = \int \tilde{B}_{3\lambda} q_{3\lambda} d\lambda \quad (6')$$

Dans les égalités (6) et (6') les indices 1, 2 et 3 dont est dotée la fonction q_λ signifient que cette fonction peut dépendre de la composition spectrale du rayonnement pénétrant dans l'oeil.

On déduit des égalités (6) et (6') que si $q_{1\lambda} = q_{2\lambda} = q_{3\lambda} = q_{12\lambda}$, on a

$$m + n = 1 \quad (7)$$

Mais l'expérience montre que $m + n \neq 1$ et par conséquent:

$$q_{1\lambda} \neq q_{2\lambda} \neq q_{3\lambda} \neq q_{12\lambda} \quad (8)$$

L'inégalité (8) signifie que la sensibilité spectrale de l'oeil q_λ pour un niveau d'adaptation donné (puisque le rayonnement \tilde{B}_3 est demeuré constant au cours des trois mesures effectuées) dépend de la composition spectrale du rayonnement pénétrant dans l'oeil.

Une théorie récemment développée des lois physiques régissant les processus qui se déroulent dans la rétine de l'oeil sous l'action de la radiation [4] fournit une explication qualitative des résultats expérimentaux qui viennent d'être exposés. Cette explication se présente comme suit:

La sensation lumineuse, autrement dit la luminosité, est déterminée par le nombre moyen* des impulsions qui partent le long des fibres nerveuses de l'unité de surface de la rétine de l'oeil par unité de temps. D'autre part la fréquence de ces impulsions est fonction du nombre moyen des photons qui atteignent les cellules de la rétine par unité de temps, de la probabilité de la dissociation des molécules des matières se dissociant sous l'action de la lumière contenues dans les cellules et de la concentration de ces matières. Quand le nombre de photons incident

* Calculé pour un laps de temps suffisamment prolongé.

par unité de temps sur une surface donnée de la rétine croît, la concentration des matières diminue par suite de l'augmentation du nombre des molécules de ces matières qui ont été déjà dissociées. Par conséquent, la fréquence des impulsions ne croît pas linéairement avec l'augmentation du flux énergétique de la radiation. Il existe dans les cellules de la rétine plusieurs espèces différentes de matières se dissociant sous l'action de la lumière, dont la probabilité de dissociation varie différemment en fonction de la longueur d'onde des photons agissant sur ces cellules. La concentration des différentes matières se dissociant sous l'action de la lumière ainsi que les modifications de cette concentration sous l'action des radiations sont également différentes. Les impulsions qui suivent les fibres nerveuses après avoir quitté la rétine sont créées par une action commune de ces matières différentes. Le «travail» qui incombe à chacune de ces matières varie en fonction de la composition spectrale et de la puissance de la radiation agissant sur la rétine de l'oeil. C'est justement ce qui provoque les variations de la sensibilité spectrale de l'oeil lors des variations de la composition spectrale de la radiation agissant sur l'oeil et du niveau d'adaptation (d'excitation) de ce dernier.

Les considérations qui viennent d'être exposées ont permis d'écrire la fonction de la sensibilité spectrale de l'oeil sous forme de l'expression (2) qui explique les particularités des propriétés métrologiques de l'oeil. L'expression de la sensibilité spectrale de l'oeil établie à la suite de l'étude du processus physique se déroulant dans la rétine de l'oeil étaye vigoureusement les données expérimentales montrant que l'oeil ne possède nullement les propriétés métrologiques «naturelles» qui lui étaient attribuées jusqu'ici sans vérification vraiment sérieuse.

Ainsi les recherches ont démontré que le critérium de la sensation lumineuse — la luminosité — et l'expression (1) possèdent des propriétés différentes et que par conséquent les définitions I et II ne sont pas concordantes. Ce manque de concordance peut entraîner des écarts allant jusqu'à 20% dans les valeurs numériques des grandeurs photométriques déterminées à partir de l'une ou de l'autre de ces définitions; ceci ne peut être considéré comme satisfaisant même pour les mesures photométriques les moins précises.

II

Les progrès de la photométrie ont permis de constater que la définition II assure aux grandeurs photométriques en principe une netteté suffisante et fournit un critérium net pour apprécier la précision des mesures photométriques; par conséquent elle donne la possibilité d'opérer en cas de nécessité avec une précision plus grande. Ces considérations ainsi que celles qui furent énoncées par J. Urbanek et E. Ferencz (citées plus haut) nous inclinent à donner la préférence à la définition II et à la prendre comme base théorique et pratique de la photométrie.

Pour effectuer les mesures photométriques on a largement utilisé jusqu'ici les photomètres visuels. Il résulte de l'étude des propriétés métrologiques de l'oeil réel qu'une précision élevée ne peut être obtenue avec les photomètres visuels que lors des comparaisons des radiations équispectrales.

On voudrait naturellement savoir comment cela est-il arrivé que les écarts notables pouvant atteindre 20% entre les valeurs numériques réelles de grandeurs photométriques (avec la définition II prise comme critérium d'égalité) et les résultats de mesure de ces grandeurs à l'aide de photomètres visuels (avec la définition I prise comme critérium d'égalité) sont pendant si longtemps restés inaperçus? En réponse à cette question nous pouvons évoquer les considérations suivantes:

a) De nombreuses mesures photométriques réalisées avec une précision réellement élevée (comme par exemple la calibration des lampes et des plaques étalons, etc.) s'effectuent par la méthode de comparaison de luminosités, pratiquement avec des radiations unispectrales.

b) Lors des mesures (comparaisons) photométriques des radiations hétérospectrales, on utilise d'ordinaire une seule et unique méthode (celle du photomètre à papillotement ou, plus souvent encore, celle des verres colorés). Cela signifie que les résultats obtenus sont acceptés sans vérification d'aucune sorte comme la valeur numérique réelle de la grandeur mesurée.

c) Différentes sortes d'erreurs, d'écarts, de défauts de concordance qui ont été constatés à maintes reprises lors des mesures photométriques visuelles ont été attribués à des raisons fortuites ou à des raisons propres à la méthode

ou au procédé de mesure employés, mais non aux propriétés métrologiques fondamentales de l'oeil.

C'est justement en raison de la prépondérance de ces points de vue que les derniers congrès de la CIE ont recommandé de poursuivre l'étude des moyens de sélection des observateurs pour chaque méthode particulière de photométrie visuelle et, en général, pour les méthodes visuelles qui permettent d'obtenir la concordance optima des résultats des mesures avec les définitions photométriques [11]. Cependant il résulte des études des propriétés métrologiques de l'oeil que les causes d'erreurs et d'écarts dans les mesures photométriques visuelles doivent être recherchées non seulement dans les circonstances fortuites qui peuvent être écartées, mais surtout dans des raisons de principe, déterminées par les propriétés physiques de l'oeil. Pour améliorer la précision des mesures photométriques, il faut attacher une plus grande importance au développement de la photométrie physique. Si l'utilisation des méthodes physiques des mesures photométriques s'avère impossible pour telle ou autre raison dans un cas particulier et qu'on soit obligé d'utiliser quand même l'oeil en qualité de récepteur de mesure, il est nécessaire de tenir compte d'une façon ou d'une autre de ces particularités métrologiques.

Pourtant les mesures photométriques basées sur la définition I ne peuvent à elles seules satisfaire à toutes les exigences de la photométrie. En plus de la mesure des radiations au moyen des grandeurs photométriques, la photométrie doit pouvoir évaluer quantitativement la réaction de l'oeil, se trouvant dans des conditions d'éclairage différentes. Comme on peut le constater d'après les données numériques énoncées plus haut, la fonction de référence de l'efficacité lumineuse relative, établie par la CIE, permet d'apprécier la sensation lumineuse dans les conditions de la vision photopique avec une erreur ne dépassant pas $\pm 20\%$ environ. Une telle précision dans l'évaluation de la réaction de l'oeil serait suffisante pour les besoins pratiques de la photométrie si elle se conservait également pour la vision méso-pique.

Dans ces dernières conditions les écarts entre les égalités de luminosité et celle de lumière (basés sur V_{λ}) peuvent être très importants. La figure 1 représente, à titre d'exemple, les variations en fonction du niveau d'adaptation de l'oeil du rapport de la

luminance équivalente $B(A)$ à la luminance B , pour certains rayonnements chromatiques.

Le rapport de $\frac{B(A)}{B}$ pour le niveau d'adaptation de 10 asb est pris comme unité. Il résulte des courbes de la figure 1 que la luminance équivalente du rayonnement violet dans les conditions de la vision scotopique (niveau d'adaptation de 10^{-4} à 10^{-3} asb) est environ 15 fois plus grande que la luminance du même rayonnement dans les conditions de vision photopique. Le même rapport prend la valeur de 2.10^{-2} env. pour le rayonnement rouge. Par conséquent la luminance équivalente des rayonnements rouge et violet identique aux niveaux élevés d'adaptation de l'oeil, diffère de 750 fois pour les niveaux bas, tandis que la luminance de ces mêmes rayonnements, évaluée d'après la fonction de l'efficacité lumineuse relative adoptée par la CIE, demeure égale. Il s'ensuit que deux radiations chromatiques de luminance égale sont perçues par l'oeil d'une façon totalement différente aux bas niveaux d'adaptation. L'une d'elle peut être vue nettement et l'autre pas du tout. Par conséquent, ces grandeurs photométriques dont la valeur numérique a été déterminée à l'aide de l'expression (1) dans les conditions de vision mésopique sont inutilisables pour l'évaluation quantitative des réactions de l'oeil.

Pour obtenir des évaluations quantitatives des réactions de l'oeil à n'importe quels niveaux d'adaptation, il a fallu créer une branche particulière de la photométrie, la photométrie des grandeurs photométriques équivalentes. L'évaluation de grandeurs photométriques équivalentes est basée sur l'égalité des luminosités (de l'équivalence des sensations lumineuses) tandis que l'évaluation des grandeurs photométriques est effectuée à l'aide de la fonction de référence de l'efficacité lumineuse relative.

La précision des mesures et des évaluations des grandeurs photométriques équivalentes peut être basse, en comparaison de celle des autres disciplines métrologiques. Ceci se détermine par le fait que les valeurs photométriques équivalentes sont destinées à l'évaluation quantitative de la réaction de l'oeil — de la luminosité — dont les variations importantes n'entraînent que de faibles modifications des fonctions de la vision (de l'acuité visuelle, de la sensibilité différentielle, etc.). Une précision de $\pm 10\%$ paraît être largement suffisante. Et en ce qui concerne la préci-

sion des calculs des grandeurs photométriques équivalentes, sa valeur numérique est déterminée plutôt par des possibilités d'ordre pratique, que par d'autres considérations.

III

On peut répartir les récepteurs des radiations en général en deux groupes. Au premier groupe appartiennent les récepteurs à réaction «directe» qui peut être mesurée directement et exprimée par une grandeur physique quelconque, comme par exemple: la f. e. m., l'intensité du courant, la température, etc. Le deuxième groupe comprend le récepteur à réaction «conventionnelle», c'est-à-dire les récepteurs dont la réaction ne peut être exprimée par une grandeur physique quelconque en raison des difficultés d'ordre pratique ou de principe. L'oeil appartient à la catégorie des récepteurs à réaction conventionnelle.

La réaction conventionnelle peut être exprimée quantitativement au moyen d'un rayonnement pris comme étalon, à l'une des grandeurs duquel on **attribue** un nombre déterminé des unités effectives. L'utilisation d'un rayonnement étalon entraîne la nécessité de déterminer la loi de la variation du nombre d'unités effectives en fonction des caractéristiques énergétiques du rayonnement étalon. Evidemment, la loi linéaire est la plus avantageuse pour la pratique. La loi linéaire conventionnelle* est largement utilisée dans les mesures photométriques visuelles, quoiqu'il soit parfaitement connu que la réaction réelle de l'oeil, les impulsions de fréquence plus ou moins élevée (voir p. 7) varie d'une façon non linéaire en fonction du flux énergétique de la radiation pénétrant dans l'oeil. L'utilisation d'un rayonnement étalon entraîne également la nécessité d'établir un critérium d'égalité numérique des grandeurs effectives homogènes des radiations confrontées. Ainsi la réaction du récepteur à un rayonnement donné est égale au nombre des unités effectives du rayonnement étalon égalisé d'après un critérium déterminé avec le rayonnement donné.

L'utilisation d'un rayonnement étalon conduit à la définition de la notion de la sensibilité absolue du récepteur des radiations. La sensibilité absolue d'un récepteur est le rapport de sa réaction au rayonnement étalon à la puissance de ce dernier.

* Nous utilisons le terme «conventionnelles», car le nombre d'unités correspondant à tel ou tel autre flux énergétique étalon a été fixé par convention.

La réaction N d'un récepteur de rayonnement exprimée en unités effectives (u. eff.) peut être représentée par l'expression suivante:

$$N \{ u \cdot \text{eff} \} = \check{P}_w \frac{N_e \left\{ \frac{u \cdot \text{eff} \cdot}{w} \right\}}{\check{P}_e} \int_0^\infty q_\lambda \varepsilon_\lambda \{ \text{cm}^{-1} \} d\lambda \{ \text{cm} \} \quad (9)$$

où: \check{P}_w — puissance du rayonnement agissant sur le récepteur,
 ε_λ — répartition relative de la puissance du rayonnement d'après les longueurs d'onde,
 \check{P}_e — puissance du rayonnement étalon ayant entraîné (à égalité d'autres conditions) la réaction N_e ,
 q_λ — la sensibilité spectrale relative du récepteur qui peut être fonction non seulement de la longueur d'onde λ mais aussi d'autres grandeurs.

L'expression de la réaction du récepteur peut être utilisée comme base dans l'élaboration de n'importe quel système d'unités photométriques.

L'élaboration d'un système quelconque d'unités photométriques peut être réalisée d'après l'un des deux schémas décrits plus loin.

Le premier schéma préconise une simplification, dans toute la mesure du possible, de la fonction q_λ . Au lieu de q_λ , on emploie les valeurs rapprochées de la sensibilité spectrale relative q'_λ . Si on dispose de la fonction q'_λ , on peut, en se basant sur l'expression (9), exprimer le flux effectif F (ou toute autre grandeur de base) à l'aide de la formule suivante:

$$F = \check{F} \frac{F_e}{\check{F}_e} \int q'_\lambda \varepsilon_\lambda d\lambda \quad (10)$$

Ici \check{F} et \check{F}_e sont les flux énergétiques (les puissances) des rayonnements donné et étalon.

Les mesures des grandeurs effectives définies ainsi doivent être effectuées à l'aide d'un récepteur dont la sensibilité spectrale relative est q'_λ . Des mesures effectuées avec un récepteur à sensibilité spectrale différente donneront aux grandeurs effectives d'autres valeurs numériques que celles qui résultent de l'expression (10). Si on est obligé d'utiliser pour les mesures un récep-

teur quelque peu différent, les écarts que nous venons d'indiquer doivent être soit évalués quantitativement, soit compris dans l'erreur de mesure.

Les calculs des grandeurs effectives sont effectués directement en partant de l'expression (10) qui sert de définition à ces grandeurs.

La photométrie est basée sur ce premier schéma. Les fonctions de l'efficacité lumineuse relative adaptées par la CIE donnent une représentation simplifiée, approchée de la sensibilité spectrale de l'œil réel. L'utilisation de l'œil pour les mesures photométriques, sans évaluation quantitative des erreurs introduites de ce fait dans les résultats de mesure, constitue le défaut essentiel de cette méthode de mesures photométriques qui réduit leur précision d'une façon notable.

Le deuxième schéma qui peut être utilisé se présente ainsi:

La définition de principe (et seulement de principe) des grandeurs effectives est donnée par l'expression (10). Mais il est sous-entendu que la fonction de la sensibilité spectrale **réelle** du récepteur de radiation est également comprise dans cette expression. Etant donné que la détermination de valeurs numériques de q_A réel peut s'avérer impossible dans ce stade de calculs, l'expression (10) ne peut être utilisée pour la détermination des valeurs numériques des grandeurs effectives ainsi que des rapports numériques entre ces dernières. Il s'ensuit que la détermination des valeurs effectives doit être effectuée par la voie de mesures à l'aide du même récepteur dont les réactions sont à déterminer.

Il existe encore une autre considération qui oblige de baser la détermination fondamentale de la valeur numérique des grandeurs effectives (dans le cas d'utilisation du deuxième schéma) non pas sur l'expression (10) mais sur les mesures actuelles. Dans le cas où la fonction de la sensibilité spectrale d'un récepteur réel dépend non seulement de la longueur d'onde λ , mais également d'autres facteurs, comme par exemple du flux énergétique agissant sur le récepteur, la détermination de la valeur numérique de la grandeur recherchée comprendra nécessairement un calcul effectué par la méthode des approximations successives (voir. p. 29). L'utilisation de cette méthode de calcul par approximations successives présente des inconvénients pour la détermination fondamentale des valeurs numériques des grandeurs étudiées.

L'expression numérique d'une grandeur physique (et par conséquent photométrique) joue un rôle primordial. Par conséquent la détermination réelle, complète de la grandeur effective est réalisée dans le cas d'application du deuxième schéma au moyen de sa mesure qui donne la valeur numérique **réelle** de la grandeur effective. Il en résulte que la méthode de mesure (y compris la construction de l'appareil de mesure) a, dans ce cas, une grande importance non seulement pratique mais également de principe. La méthode de mesure doit être élaborée et fixée dans tous ses détails.

En ce qui concerne les calculs de grandeurs photométriques dont le système est basé sur l'emploi du deuxième schéma, ils comportent nécessairement une certaine erreur systématique par rapport aux résultats de mesures. La grandeur de ces erreurs va dépendre du degré d'approximation avec lequel la fonction q'_{λ} , utilisée pour les calculs (à l'aide de l'expression 10) représente la sensibilité spectrale réelle du récepteur, utilisé pour la mesure des grandeurs effectives.

IV

Tout ce qui précède a été pris comme base pour l'élaboration d'un système des grandeurs photométriques équivalentes et la mise au point des méthodes de mesures et de calculs de ces grandeurs constituant dans l'ensemble la photométrie des grandeurs lumineuses équivalentes.

La sensibilité spectrale de l'oeil et, par conséquent, la valeur numérique des grandeurs photométriques équivalentes, est fonction du niveau d'adaptation de l'oeil. Il en découle la nécessité d'exprimer la grandeur photométrique équivalente à l'aide de deux chiffres: $M(A)$.

M exprime la grandeur elle-même, et A indique le niveau d'adaptation pour lequel (ou auquel) la grandeur équivalente a été déterminée. Il est plus indiqué d'exprimer le niveau d'adaptation en apostilbes (asb) afin de le différencier de la luminance. On s'abstient d'indiquer la dépendance de la sensibilité spectrale de l'oeil de la composition spectrale du rayonnement pour les deux raisons suivantes:

a) La valeur numérique de la grandeur photométrique équivalente, obtenue par la mesure du rayonnement donné, tient déjà compte de cette dépendance puisque le rayonnement étudié

a une composition spectrale déterminée qui lui est particulière.

b) La valeur numérique de la grandeur photométrique équivalente obtenue par voie de calcul, ne tient pas compte non plus de cette dépendance (voir pp. 27-28).

On utilise en qualité de rayonnement étalon celui d'une lampe à incandescence étalon au tungstène, avec une température de couleur T_c , égale à 2360° K. Le rayonnement étalon est caractérisé par les grandeurs photométriques basées sur la courbe de référence de l'efficacité lumineuse relative. Ainsi la réaction de l'oeil est caractérisée quantitativement par les unités photométriques du rayonnement étalon, le nombre de ces dernières étant une fonction linéaire du flux énergétique de ce rayonnement. La réaction de l'oeil à d'autres rayonnements est exprimée par sa réaction en rayonnement étalon, l'égalité de luminosité des rayonnements étalon et à mesurer étant réalisée. Le niveau d'adaptation de l'oeil correspondant à une mesure donnée est déterminé par la luminance du rayonnement étalon, pour lequel l'égalité des luminosités a été atteinte. L'égalisation des luminosités de deux rayonnements est réalisée à l'aide d'un photomètre visuel spécial destiné à la mesure des grandeurs photométriques équivalentes. Le schéma de principe et la construction de cet appareil seront décrits plus loin.

La grandeur de base dans le système des grandeurs lumineuses équivalentes est la luminance équivalente [12].

La définition suivante peut être proposée en vue de généraliser et de préciser la notion de la luminance équivalente:

La luminance équivalente $B(A)$ est égale à la luminance du rayonnement étalon, multipliée par le rapport des nombres n_2/n_1 , où n_2 et n_1 sont les nombres par lesquels il faut multiplier les luminances énergétiques des rayonnements étalon et à mesurer pour obtenir l'égalité de luminosité. La luminance équivalente est déterminée à partir de la notion de la luminance équivalente particulière, caractérisant la sensation lumineuse de chaque observateur. Etant donné que l'égalisation isolée des luminances (la mesure isolée) est effectuée par l'observateur avec une certaine erreur, la définition de principe d'une luminance équivalente particulière doit être une expression de forme suivante:

$$b(A) = B \lim_{M \rightarrow \infty} \left. \frac{\sum_{i=1}^{i=M} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^i}{M} \right| \quad (11)$$

où $\left(\frac{n_o}{n_i}\right)_i$ est le résultat de la mesure isolée.

M — le nombre total des mesures (égalisations) effectuées par l'opérateur donné.

La luminance équivalente doit caractériser la sensation lumineuse de l'«œil moyen international». Par conséquent la luminance équivalente $B(A)$ doit être calculée comme la moyenne des luminances équivalentes particulières d'un certain nombre d'observateurs:

$$B(A) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \frac{b_i(A)}{N} = B_e \frac{n_o}{n_i} \quad (12)$$

où N est le nombre d'observateurs ayant pris part aux mesures de la luminance équivalente du rayonnement donné.

La question des valeurs numériques de M et de N figurant dans les expressions (11) et (12) permettant d'obtenir la précision recherchée dans les mesures de $b(A)$ et de $B(A)$ sera examinée plus loin.

L'éclairement équivalent $E(A)$ créé par un rayonnement donné est numériquement égal à l'éclairement créé par le rayonnement étalon à condition que soit réalisée l'égalité des luminosités, créées par les deux rayonnements (l'étalon et celui à mesurer) sur une surface diffusante à facteur spectral de réflexion constant:

$$p_{e\lambda} = \text{const} \approx 0,93 \div 0,96.$$

L'intensité lumineuse équivalente $I(A)$ et le flux lumineux équivalent $F(A)$ sont calculés à partir de la luminance équivalente ou de l'éclairement équivalent, ainsi que se calculent l'intensité lumineuse I et le flux lumineux F en partant des données initiales correspondantes.

La différence entre ce calcul et celui des grandeurs photométriques classiques est que les données initiales (pour les besoins du calcul) des valeurs lumineuses équivalentes doivent être connues pour quelque niveau d'adaptation déterminé. Ainsi lors du calcul du flux lumineux équivalent $F(A)$ d'après les courbes de distribution équivalente de l'intensité, il est nécessaire que l'intensité lumineuse équivalente ait été déterminée dans toutes les directions à un niveau d'adaptation constant. La pos-

sibilité de telles mesures est assurée par la construction d'un photomètre destiné aux mesures des grandeurs photométriques équivalentes (voir p. 19).

Le facteur de transmission équivalente $\tau (A)$ d'un filtre est défini comme une grandeur inverse au nombre n , par lequel il faut multiplier le flux lumineux incident sur la surface du filtre afin d'obtenir l'égalité des flux lumineux équivalents des rayonnements transmis et reçus par le filtre.

Posons $F_0 (A)$ — flux lumineux équivalent du rayonnement incident sur le filtre (ou un nombre qui lui est proportionnel), $\tau (A) \cdot n \cdot F_0 (A)$ — flux lumineux équivalent du rayonnement transmis par le filtre (ou un nombre qui lui est proportionnel).

Le nombre n indique par combien il faut multiplier le flux énergétique du rayonnement pour lequel $\tau (A)$ est mesuré pour conserver l'égalité des luminosités en présence ou en absence du filtre.

$$F_0(A) = \tau(A) \cdot n \cdot F_0(A), \text{ d'où } \tau(A) = \frac{1}{n} \quad (13)$$

Le coefficient de réflexion équivalente est déterminé d'une façon analogue.

V

Un système de grandeurs (de définitions) ne concordant pas avec un système de mesure et de calcul réellement utilisés ne se prête pas à une application pratique.

C'est pourquoi un photomètre visuel spécial a été conçu et réalisé pour la mesure des grandeurs photométriques équivalentes (cf. fig. 2).

Le champ photométrique de cet appareil comprend un champ de mesure, couvert lors de la graduation par le rayonnement étalon et lors des mesures par le rayonnement à mesurer, ainsi qu'un champ de comparaison couvert par le rayonnement de comparaison. Lors des mesures effectuées à des niveaux d'adaptation différents on utilise deux champs photométriques de formes différentes.

Pour les mesures aux niveaux d'adaptation peu élevés (de 10^{-4} à 1 asb) le champ de mesure est constitué par un cercle d'un diamètre angulaire de 10° . Le champ de comparaison a une forme annulaire et entoure le champ de mesure; son diamètre

extérieur est égal à 20° . Pour les mesures aux niveaux d'adaptation photopiques (supérieurs à 1 asb) on utilise un champ spécial «en mosaïque», constitué par 12 orifices ronds, chacun d'eux ayant un diamètre angulaire de $20'$. Ces orifices sont disposés au milieu du champ de comparaison (diamètre 15° environ) sur une surface ayant la forme d'un carré, dont la diagonale mesure 2° (cf. fig. 3).

Le photomètre comprend les parties essentielles suivantes:

a) Deux lampes de comparaison 110 V-500 W, enclenchées indépendamment l'une de l'autre. Deux lampes sont utilisées pour élargir le diapason des variations de luminance du champ de comparaison.

b) Un système d'affaiblissement constitué par deux condensateurs à diaphragmes à fente et à diaphragmes annulaires et une plaque blanche intermédiaire amovible. Cette dernière peut être placée à l'endroit du filament de la première lampe *; le deuxième condensateur projette alors sur la plaque l'image du filament de la deuxième lampe. Le système d'affaiblissement permet de modifier la luminance du champ de comparaison dans le rapport de 1 à plus de 50 millions.

c) Un mécanisme de commutation des champs photométriques.

d) Une plaque intermédiaire, interposée sur le chemin de parcours du rayonnement couvrant le champ de mesure. Cette plaque intermédiaire permet de modifier d'une façon pratiquement non sélective dans le rapport de 1 à 10^3 l'éclairement de la plaque blanche réceptrice qui reçoit le rayonnement à mesurer. Elle est nécessaire pour permettre d'effectuer les mesures à un niveau d'adaptation constant.

L'appareil est doté en plus d'un lot de filtres colorés amovibles, introduits dans l'un des condensateurs à l'aide d'un dispositif spécial. Le recouvrement par verre coloré d'une partie de la surface utile d'un condensateur permet de modifier dans de larges limites la chromaticité du rayonnement de comparaison.

Le calibrage du photomètre s'effectue à l'aide d'un rayonnement étalon, couvrant le champ de comparaison et consiste dans

* Celle-ci étant dans ce cas débranchée et déplacée.

la détermination de la luminance équivalente du rayonnement de comparaison pour des ouvertures différentes du système d'affaiblissement et pour des positions différentes des filtres de comparaison. On commence par effectuer le calibrage «blanc», c'est-à-dire le calibrage du système affaiblisseur par la voie d'égalisation photométrique du rayonnement étalon que l'on fait varier dans de larges limites, d'un nombre déterminé de fois, avec le rayonnement des lampes de comparaison. La composition spectrale de cette dernière radiation peut être choisie arbitrairement. Mais il est plus commode de régler les conditions de fonctionnement de lampes de comparaison avant de commencer la calibration de façon que la couleur de leur rayonnement se rapproche le plus possible de celle du rayonnement étalon ($T_c = 2360^\circ \text{K}$).

La calibration des filtres de comparaison est bien plus compliquée; elle consiste dans la mesure des facteurs de transmission équivalente de ces filtres (pour le rayonnement de comparaison) à des niveaux d'adaptation différents. Le rayonnement étalon qui couvre le champ de mesure assure la constance du niveau d'adaptation; les filtres sont interposés sur le chemin du parcours du rayonnement de comparaison.

L'égalisation des luminosités du rayonnement blanc (étalon) avec le rayonnement chromatique (rayonnement de comparaison transmis par le filtre à étalonner) présente certaines difficultés. L'accroissement des écarts entre les résultats de mesure effectués dus à ce que les rayonnements sont hétérochromes et hétérospectraux, doit être compensé par l'augmentation du nombre d'observateurs et du nombre de mesures effectuées par chaque observateur.

L'égalisation en tant que luminosité des rayonnements hétérochromes ne présente pas de difficultés particulières aux bas niveaux d'adaptation (vision scotopique et mésopique). Un spécialiste expérimenté travaillant avec un champ annulaire à un niveau d'adaptation égal, p. ex. à 10^{-2} asb, obtient lors de la comparaison du rayonnement rouge (filtre KC-1) et du rayonnement blanc un écart moyen par rapport à la valeur moyenne de ses mesures, égal à $\pm 4\%$, et lors de la comparaison du rayonnement (filtre CC-5) et du rayonnement blanc, un écart de $\pm 2\%$ environ. Des résultats similaires sont obtenus pour d'autres niveaux d'adaptation dans les limites de 10^{-4} à 1 asb.

L'analyse des chiffres obtenus a montré que la réalisation de la mesure de luminance équivalente particulière aux bas niveaux d'adaptation avec une erreur de $\pm 1\%$ exige l'exécution par chaque observateur d'environ 10 mesures lors de la comparaison du rouge et du blanc et d'environ 5 mesures pour celle du bleu et du blanc.

Lors de l'égalisation en tant que luminosité des rayonnements hétérochromes effectuée dans les conditions de vision photopique (niveau d'adaptation de 1 asb et plus), la marge des écarts des mesures croît. Ainsi p. ex. lors de la comparaison en tant que luminosité des rayonnements rouge et bleu avec le rayonnement blanc au niveau d'adaptation de 10 asb à l'aide d'un champ photométrique ordinaire à division verticale dont la dimension angulaire est de 2° , il est nécessaire de faire varier la luminance énergétique de ces rayonnements dans le rapport de 1 à 1,5 environ, pour que l'observateur commence seulement à discerner le plus sombre et le plus clair des deux rayonnements comparés. L'utilisation du champ photométrique «en mosaïque» décrit plus haut ramène ce chiffre à 10% environ. L'écart moyen entre les mesures effectuées par un observateur donné lors de la comparaison en tant que luminosité des radiations hétérochromes effectuée à l'aide d'un champ photométrique «en mosaïque», ne dépasse pas 6 à 8%. Par conséquent, pour une erreur admissible de 1% lors de la mesure de la luminance équivalente particulière, l'observateur doit effectuer environ 30 à 40 mesures, et pour une erreur admissible de 0,5%, pas plus de 5 mesures.

Ainsi, le photomètre de mesure des grandeurs photométriques équivalentes permet à un observateur donné d'égaliser en tant que luminosité les rayonnements hétérochromes tout en assurant une bonne constance de résultats obtenus et la possibilité de les reproduire, et ceci tant pour les niveaux bas que pour les niveaux élevés de l'adaptation de l'œil.

La calibration des filtres de comparaison effectuée par un seul observateur ne permet pas de mesurer les grandeurs photométriques équivalentes étant donné qu'un seul observateur ne mesure que la luminance équivalente particulière. La mesure de la luminance équivalente* doit être effectuée par un groupe d'observateurs.

L'utilisation du photomètre de mesure des grandeurs photométriques équivalentes a démontré que l'écart moyen entre les luminances équivalentes particulières peut atteindre 50% pour certains rayonnements à couleurs saturées. Il s'ensuit que pour la mesure de la luminance équivalente avec une erreur ne dépassant pas $\pm 5\%$ il serait nécessaire de faire appel à un groupe de 70 observateurs.

La participation d'un groupe aussi nombreux d'observateurs dans chaque mesure effectuée est pratiquement impossible. Cependant la calibration d'un lot de filtres de comparaison avec l'aide de 70 ou plus observateurs est réalisable. Les mesures peuvent être effectuées dans des laboratoires différents avec plusieurs appareils similaires. Dans cette éventualité l'utilisation de la même méthode de mesure permettra de déterminer avec une précision toujours croissante les valeurs moyennes des facteurs de transmission équivalente d'un assemblage de filtres de comparaison, assemblage dont doit être doté chaque photomètre destiné aux mesures des grandeurs photométriques équivalentes. Ainsi le concours d'un groupe nombreux d'observateurs ne sera nécessaire que pour la calibration d'un seul assemblage de filtres de comparaison. La calibration ainsi effectuée serait analogue aux mesures des valeurs de la sensibilité spectrale de l'oeil qui ont précédé l'élaboration des fonctions de la vision photopique et scotopique.

En partant des valeurs numériques des facteurs de transmission équivalente des filtres étalons établis à des niveaux d'adaptation différents comme moyenne des résultats obtenus par un groupe nombreux d'observateurs, on peut mesurer les luminances équivalentes avec le concours de 3 à 5 observateurs seulement, sans dépasser la marge d'erreurs de $\pm 10\%$. Une telle amélioration de la précision des mesures s'explique par le fait que les filtres de comparaison rapprochent sensiblement non seulement les couleurs, mais également les compositions spectrales des rayonnements comparés.

L'emploi des filtres de comparaison introduit une certaine erreur systématique dans l'évaluation des réactions de l'oeil. Si

* Ces mesures servent de base au calcul des valeurs numériques de toutes les autres grandeurs équivalentes

le filtre recouvre la partie α de la surface utile du condensateur, la luminance équivalente du champ de comparaison $B_c(A)$ doit être calculée en partant de l'expression suivante qui doit être considérée comme une définition conventionnelle:

$$B_c(A) = (1 - \alpha)B'(A') + \alpha\tau(A)B'(A') \quad (14)$$

où $B'(A')$ est la luminance équivalente, correspondante à l'ouverture utilisée du dispositif d'affaiblissement du photomètre.

Lors des calculs effectués à partir de l'expression (14) on utilise la valeur numérique du facteur $\tau(A)$, qui a été déterminée dans des conditions différentes de celles où cette valeur est utilisée. En effet, le facteur de transmission équivalente des filtres de comparaison a été déterminé à l'aide de la mesure de la luminosité d'un rayonnement chromatique plus saturé*, que celui qui a été dilué par le mélange avec une certaine proportion de rayonnement blanc $(1 - \alpha) B'(A')$.

Par conséquent lors de la mesure de $\tau(A)$ la sensibilité spectrale de l'œil était différente de celle que l'œil aurait sous l'action du rayonnement de comparaison. La luminance équivalente du rayonnement de comparaison a été calculée à l'aide de l'expression (14). C'est justement grâce à ce fait que l'expression (14) acquiert le caractère d'une définition conventionnelle.

En partant des données numériques caractérisant la dépendance de la sensibilité spectrale de l'œil de la composition spectrale du rayonnement qui agit sur lui (cette dépendance ne dépasse pas 15%), on peut démontrer que l'erreur systématique ne dépassera pas 15%, même dans le cas le plus défavorable ($\tau(A) \rightarrow 0$ et $\alpha \rightarrow 1$). En réalité cette erreur est encore plus petite; elle ne dépasse pas 10%. Il faut souligner une fois de plus que l'erreur qui vient d'être indiquée se rapporte à l'évaluation des réactions de l'œil et non aux résultats de mesure des grandeurs photométriques équivalentes, étant donné que ces dernières sont mesurées à l'aide d'un photomètre d'une construction déterminée. Par conséquent le schéma et l'agencement du photomètre pour la mesure des grandeurs photométriques équivalentes doivent être considérés comme les éléments essentiels dont dépend la fixité des conditions de mesurage de ces grandeurs.

* Lors de cet essai le filtre de comparaison recouvrait en totalité la surface utile du condensateur.

VI

Les essais et la calibration du photomètre de mesure des grandeurs photométriques équivalentes ont été menés de front. Les valeurs numériques des facteurs de transmission équivalente de 10 filtres étalons de comparaison ont été obtenues à la suite de la calibration réalisée par deux observateurs à vue normale. Ces filtres ont été choisis de manière à ce que leur transmission spectrale couvre d'une façon à peu près égale toute la région visible du spectre.

Les facteurs de transmission équivalente ainsi obtenus ont été utilisés pour la détermination à des niveaux d'adaptation différents de la sensibilité spectrale relative de l'oeil, q_λ .

La sensibilité spectrale relative de l'oeil a été déterminée pour les niveaux d'adaptation suivants: 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} , 1, 10 asb. La dépendance de la fonction q_λ de la composition spectrale du rayonnement n'a pas été prise en considération puisque les fluctuations des valeurs numériques de la réaction de l'oeil du fait de cette dépendance ne dépassent point pour tous les niveaux d'adaptation la valeur de 15%.

Ainsi pour chaque niveau d'adaptation on a procédé à l'évaluation d'une seule fonction de la sensibilité spectrale de l'oeil; cette fonction a été choisie pour représenter (au niveau d'adaptation donné) l'égalité des luminosités des rayonnements de compositions spectrales différentes avec la plus petite erreur possible.

Les valeurs numériques de la sensibilité spectrale relative de l'oeil ont été déterminées de la façon suivante. Les facteurs de transmission équivalente de 10 filtres de comparaison ont été calculés d'après les fonctions de la sensibilité spectrale de l'oeil à des niveaux d'adaptation différents proposés par divers auteurs (S. Mätsel, E. Ratner, Wheeler).

En partant de la confrontation des valeurs obtenues par voie de calcul et de celles résultant des mesures effectuées, on a réussi ensuite à l'aide de certains calculs complémentaires (effectués pour chaque filtre et pour chaque niveau d'adaptation), à mettre sur pied des valeurs numériques de la sensibilité spectrale relative de l'oeil (cf. tableau I) telles que la concordance entre les valeurs calculées et celles mesurées des facteurs de transmission équivalente des dix filtres en question, a été assurée avec une marge de $\pm 15\%$ à tous les niveaux d'adaptation (cf. tableau II).

Tableau II

Niveau d'adaptation de l'oeil en asb (A)

No	Couleur du filtre	10 ⁻⁴ asb			10 ⁻³ asb			10 ⁻² asb			10 ⁻¹ asb			1 asb		
		$\tau(A)$ mes.	$\tau(A)$ calc.	$\Delta\%$	$\tau(A)$ mes.	$\tau(A)$ calc.	$\Delta\%$	$\tau(A)$ mes.	$\tau(A)$ calc.	$\Delta\%$	$\tau(A)$ mes.	$\tau(A)$ calc.	$\Delta\%$	$\tau(A)$ mes.	$\tau(A)$ calc.	$\Delta\%$
1	Bleu-violet	0,079	0,076	-4	0,086	0,076	-12	0,080	0,063	14	0,065	0,060	-8	0,037	0,034	-8
2	Bleu	0,042	0,045	+7	0,045	0,045	0	0,043	0,040	7	0,034	0,035	+3	0,022	0,021	-5
3	Bleu céleste	0,61	0,58	10	0,62	0,58	6	0,62	0,56	-10	0,54	0,52	-4	0,42	0,41	-2
4	Vert	0,31	0,33	-3	0,36	0,33	8	0,33	0,32	-3	0,29	0,31	+7	0,26	0,27	+4
5	Jaune	0,65	0,58	-11	0,65	0,58	-11	0,66	0,59	-11	0,65	0,60	-8	0,68	0,63	-7
6	Orange clair	0,51	0,51	0	0,57	0,51	-10	0,57	0,55	-3	0,65	0,60	-8	0,72	0,74	+3
7	Orange	0,10	0,10	0	0,11	0,10	-10	0,14	0,13	-7	0,21	0,18	-14	0,40	0,35	-12
8	Rouge-orange	0,021	0,022	+5	0,023	0,022	-4	0,031	0,035	+3	0,074	0,057	-10	0,18	0,17	-6
9	Rouge	0,0049	0,0051	-4	0,0052	0,0051	-2	0,010	0,0093	-7	0,027	0,025	-7	0,072	0,074	+3
10	Pourpre	0,19	0,18	-5	0,19	0,18	-5	0,19	0,18	-5	0,20	0,19	-5	0,24	0,21	-12

Remarque: $\tau(A)$ mes — facteur de la transmission équivalente au niveau d'adaptation A, obtenu expérimentalement.
 $\tau(A)$ calc — ditto, obtenu par voie de calculs en partant de la fonction de la sensibilité spectrale de l'oeil.

Tableau I

Niveaux d'adaptation de l'oeil en asb (A)

λ mmk	10 ⁻⁴ asb	10 ⁻³ asb	10 ⁻² asb	10 ⁻¹ asb	1 asb
	$q_{\lambda} (10^{-4})$	$q_{\lambda} (10^{-3})$	$q_{\lambda} (10^{-2})$	$q_{\lambda} (10^{-1})$	$q_{\lambda} (1)$
400	0,03 ₀	0,03 ₁	0,02 ₅	0,01 ₉	0,005 ₀
420	0,10	0,10	0,08 ₀	0,06 ₇	0,045
440	0,22	0,22	0,21	0,17	0,11
460	0,42	0,42	0,37	0,33	0,21
480	0,6 ₂	0,6 ₈	0,6 ₁	0,5 ₇	0,38
500	0,9 ₇	0,9 ₇	0,9 ₀	0,8 ₅	0,6 ₁
520	0,9 ₅	0,9 ₅	0,9 ₆	0,9 ₉	0,9 ₁
540	0,6 ₃	0,6 ₃	0,6 ₉	0,7 ₆	0,9 ₈
560	0,32	0,32	0,38	0,47	0,7 ₅
580	0,11	0,11	0,15	0,23	0,5 ₁
600	0,03 ₁	0,03 ₁	0,04 ₇	0,10	0,29
620	0,008 ₃	0,008 ₁	0,01 ₅	0,04 ₂	0,14
640	0,002 ₃	0,002 ₀	0,005 ₀	0,01 ₇	0,07 ₀
660	0,0006 ₁	0,0006 ₀	0,001 ₂	0,004	0,02 ₀
680	—	—	—	0,0007	0,008 ₀
700	—	—	—	—	0,001 ₀

Les courbes de la sensibilité spectrale de l'oeil à des niveaux d'adaptation différents sont représentées sur la figure 4.

Si l'on tient compte du fait que les données dont on disposait jusqu'ici différaient entre elles et d'avec les résultats de mesure de plusieurs fois leur propre valeur, le résultat obtenu doit être considéré comme satisfaisant. Ceci est d'autant plus vrai que les écarts de $\pm 15\%$ existant entre les valeurs calculées et les résultats de mesure ont jusqu'à un certain point un caractère systématique dû à ce que la sensibilité spectrale de l'oeil dépend de la composition spectrale de la radiation qui pénètre dans ce dernier.

Les courbes de la sensibilité relative spectrale aux niveaux d'adaptation de 1 asb et de 10 asb, relevées à l'aide d'un champ «en mosaïque» dont la diagonale mesure 2° angulaires, par deux observateurs ayant participé à la calibration des filtres de comparaison, se sont révélées très proches de la courbe d'efficacité lumineuse photopique de la CIE.

Les courbes de la sensibilité spectrale relative pour les niveaux d'adaptation de 10^{-4} et 10^{-3} asb sont proches l'une de l'autre, mais diffèrent sensiblement de celle de l'efficacité lumineuse relative scotopique dont les valeurs numériques ont été adoptées par le Congrès de 1951 de la CIE. Ceci peut être expliqué premièrement par la différence des méthodes de mesure et deuxièmement par le nombre insuffisant d'observateurs qui y prirent part.

D'autre part il est nécessaire d'admettre, en tenant compte de ce que les deux observateurs possèdent une vue photométrique normale, et en absence d'autres données plus probantes, que les valeurs numériques de la sensibilité spectrale de l'œil figurant au tableau I peuvent pratiquement être utilisées telles quelles. Il est évidemment nécessaire de poursuivre les travaux destinés à augmenter la précision de ces valeurs numériques.

VII

Le calcul des grandeurs photométriques équivalentes est effectué en partant de la définition de principe de ces grandeurs:

$$M(A) = \tilde{M} \frac{F_e}{\tilde{F}_e} \int_0^{\infty} c_{\lambda} q_{\lambda}(A) d\lambda \quad (10^1)$$

La signification des symboles employés étant:

$M(A)$ — certaine grandeur photométrique équivalente,

A — niveau d'adaptation correspondant à la valeur de M ,

\tilde{M} — la valeur énergétique correspondante de la même radiation,

F_e / \tilde{F}_e — équivalence lumineuse du rayonnement étalon,

c_{λ} — distribution spectrale relative de l'énergie du rayonnement mesuré,

$q_{\lambda}(A)$ — sensibilité spectrale de l'œil correspondant au niveau d'adaptation A .

Pourtant, lors des calculs on emploie au lieu des valeurs «réelles» de la sensibilité spectrale de l'œil, les valeurs appro-

chées qui tiennent compte de la dépendance de la sensibilité spectrale du niveau d'adaptation, mais ne prennent pas en considération la dépendance de cette fonction de la composition spectrale du rayonnement agissant sur l'oeil.

Afin de pouvoir déterminer les valeurs absolues des grandeurs photométriques équivalentes, et non seulement leurs valeurs relatives (comme par exemple le facteur $\tau(A)$ de transmission, etc.), il faut procéder à la réduction de la fonction $q_\lambda(A)$ en corrélation avec le rayonnement étalon choisi (utilisé). La réduction des fonctions de la sensibilité spectrale de l'oeil est réalisée en partant des considérations suivantes:

La luminance équivalente du rayonnement étalon à n'importe quel niveau d'adaptation de l'oeil doit être numériquement égale à sa luminance, déterminée à l'aide de la fonction réduite de l'efficacité lumineuse relative V_λ . Pour le calcul de la luminance équivalente $B(A)$ au niveau d'adaptation A en partant de la luminance du rayonnement B , il est nécessaire de connaître la composition spectrale de ce dernier exprimé en unités relatives e_λ et la sensibilité spectrale de l'oeil $q_\lambda(A)$ pour le niveau d'adaptation A .

On peut déduire de l'expression de base (10¹) qu'un tel calcul peut être effectué d'après l'expression.

$$B(A) = B \frac{\int e_\lambda q_\lambda(A) d\lambda}{\int e_\lambda V_\lambda d\lambda} \quad (15)$$

Le rapport des intégrales figurant dans l'expression (15) joue le même rôle que l'action actinique du rayonnement sur l'émulsion d'une plaque sensible. Ce rapport peut s'appeler pour des raisons de simplification «facteur de réadaptation de l'oeil».

Il résulte de ce qui vient d'être dit que pour un rayonnement étalon ($T_c = 2360^\circ \text{K}$) le facteur de réadaptation doit être égal à l'unité, à savoir:

$$\int e_{e\lambda} q_\lambda(A) d\lambda = \int e_{e\lambda} V_\lambda d\lambda \quad (16)$$

L'expression (16) reste vraie pour n'importe quel niveau d'adaptation A ; par conséquent les fonctions $q_\lambda(A)$ doivent

être réduites à l'aide de cette expression pour permettre le calcul de la luminance équivalente $B(A)$. Les courbes de la figure 5 représentent les fonctions $q_{\lambda}(A)$ ainsi réduites pour les niveaux d'adaptation de 10^{-4} à 10^{-3} asb; 10^{-2} ; asb; 10^{-1} asb et 1 asb.

Pour pouvoir effectuer le calcul des grandeurs photométriques équivalentes, on doit disposer des valeurs numériques de la sensibilité spectrale réduite de l'oeil pour n'importe quel niveau de son adaptation. Dans ce but on procède à la transformation de la famille des fonctions $q_{\lambda}(A_{\text{var}})$, obtenues pour des niveaux d'adaptation différents ($A = 10^{-4}$; 10^{-3} ; 10^{-2} ; 10^{-1} ; 1 et 10 asb) en famille des fonctions $q_{\lambda}(\lambda_{\text{var}})$. Chacune de ces dernières représente la sensibilité monochromatique relative de l'oeil en fonction du niveau d'adaptation. Les fonctions $q_{\lambda}(\lambda_{\text{var}})$ sont représentées comme une famille de courbes, tracées en coordonnées cartésiennes à l'échelle logarithmique; sur l'axe de l'abscisse sont portés les niveaux d'adaptation, et sur l'axe des ordonnées— la sensibilité monochromatique relative de l'oeil. L'intervalle entre les courbes voisines est égale à 10 mmk. Si on trace une droite parallèle à l'axe des ordonnées à partir du point figurant sur l'axe des abscisses, le niveau d'adaptation choisi, les points d'intersection de cette droite avec les courbes $q_{\lambda}(\lambda_{\text{var}})$ donneront les valeurs numériques de la sensibilité spectrale monochromatique de l'oeil tous les 10 mmk.

L'expression (10¹) montre que le calcul des grandeurs photométriques équivalentes doit se faire par la méthode d'approximations successives. En effet, les valeurs numériques $q_{\lambda}(A)$ sont fonction du niveau d'adaptation, et ce dernier dépend de la grandeur à calculer $M(A)$. En partant des considérations d'ordre général on a démontré la possibilité en principe d'employer la méthode d'approximations successives pour le calcul des grandeurs photométriques équivalentes. A son tour la pratique a démontré que même quand on a affaire aux rayonnements aussi «difficiles» que le rouge ou le bleu, il suffisait de deux, tout au plus de trois approximations, pour déterminer la valeur recherchée avec un écart ne dépassant pas 1 à 3% de la valeur de cette grandeur, qui est calculée avec un nombre d'approximations plus important.

VIII

On peut résumer comme suit les résultats essentiels obtenus au cours de nos recherches:

1. La nécessité d'étudier les points de départ essentiels, bases des mesures photométriques, ainsi que d'étudier et de préciser les propriétés métrologiques de l'oeil a été mise en évidence.

2. L'analyse des définitions fondamentales servant de base aux mesures photométriques a été effectuée; les conditions de concordance réciproque de ces définitions ont été établies.

3. Les propriétés métrologiques fondamentales de l'oeil ont été étudiées. Il a été établi que la sensation lumineuse, — la luminosité, — ne possède pas des propriétés d'additivité et de distributivité; cela signifie la dépendance de la sensibilité spectrale relative de l'oeil du niveau d'adaptation (y compris la vision photopique) et de la distribution spectrale relative du flux énergétique du rayonnement pénétrant dans l'oeil.

4. Il a été démontré que les propriétés métrologiques de l'oeil ne peuvent assurer la concordance réciproque des définitions servant de base aux mesures photométriques.

5. Les deux buts de la photométrie dans la technique de l'éclairage ont été formulés comme suit:

a) évaluation quantitative des rayonnements fondée sur la connaissance approfondie des propriétés de l'oeil;

b) évaluation quantitative des réactions de l'oeil réel dans des conditions d'éclairage différentes (photométrie des grandeurs lumineuses équivalentes).

6. Les bases mêmes de la photométrie en tant que science métrologique ont été étudiées. Une expression générale des réactions d'un récepteur sélectif sous l'action d'un rayonnement complexe (non monochromatique) a été mise sur pied. Cette formule de la réaction d'un récepteur sélectif peut être prise comme base générale pour chaque cas particulier de la photométrie.

7. Un système des grandeurs photométriques équivalentes a été élaboré; les définitions de principe de ces grandeurs concordent avec les méthodes pratiques de mesure et de calcul de ces dernières.

8. Une méthode de mesure de grandeurs photométriques équivalentes a été élaborée. Un photomètre destiné à la mesure des grandeurs photométriques équivalentes avec une précision de

$\pm 10\%$ à tous les niveaux d'adaptation (visions scotopique, photopique et mésopique) a été étudié et construit.

9. Les grandeurs numériques des fonctions de la sensibilité spectrale relative de l'oeil dans les conditions de vision mésopique ont été déterminées à l'aide du photomètre de mesure des grandeurs photométriques équivalentes.

10. Les questions de principe ayant trait au calcul des grandeurs photométriques équivalentes ont été résolues et les méthodes pratiques de ce calcul élaborées. Les écarts systématiques entre les résultats de calcul et ceux de mesures des grandeurs lumineuses équivalentes ne dépassent pas $\pm 15\%$, à n'importe quel niveau d'adaptation.

Il est nécessaire de préciser que l'étude des réactions de l'oeil dans toute l'étendue de ce problème sort des cadres du présent ouvrage.

Cependant, à la suite des travaux exécutés il est devenu possible d'étudier les réactions de l'oeil, s'appuyant sur une base métrologique sûre.

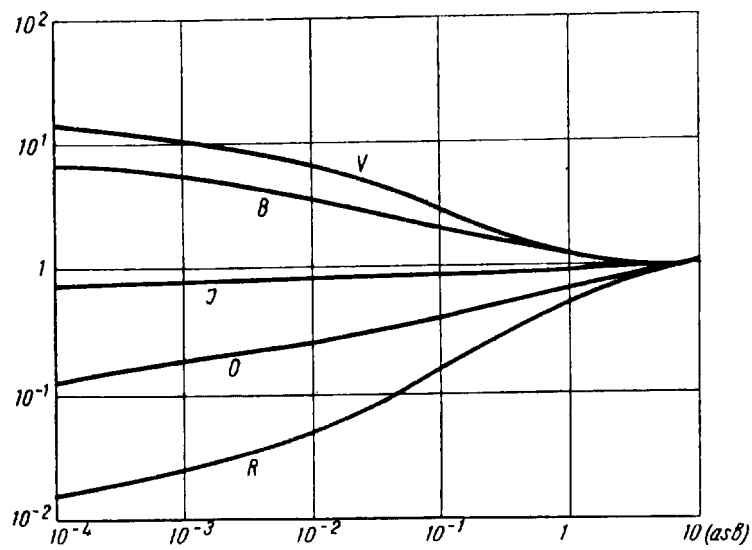


Fig. 1. Rapports de la luminance équivalente $B(A)$ à la luminance B pour quelques rayonnements chromatiques à des niveaux d'adaptation divers.
V - rayonnement violet, B - ditto bleu, J - jaune, O - orange, R - rouge.

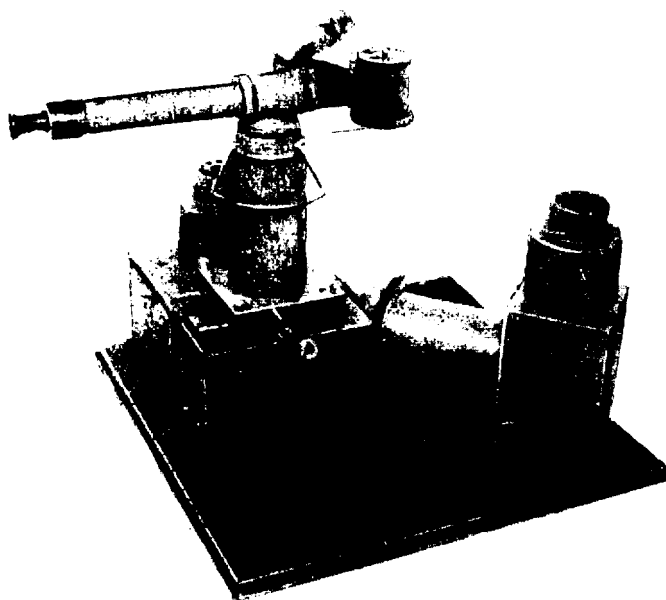


Fig. 2. Photomètre visuel spécialement construit pour le mesurage des grandeurs photométriques équivalentes

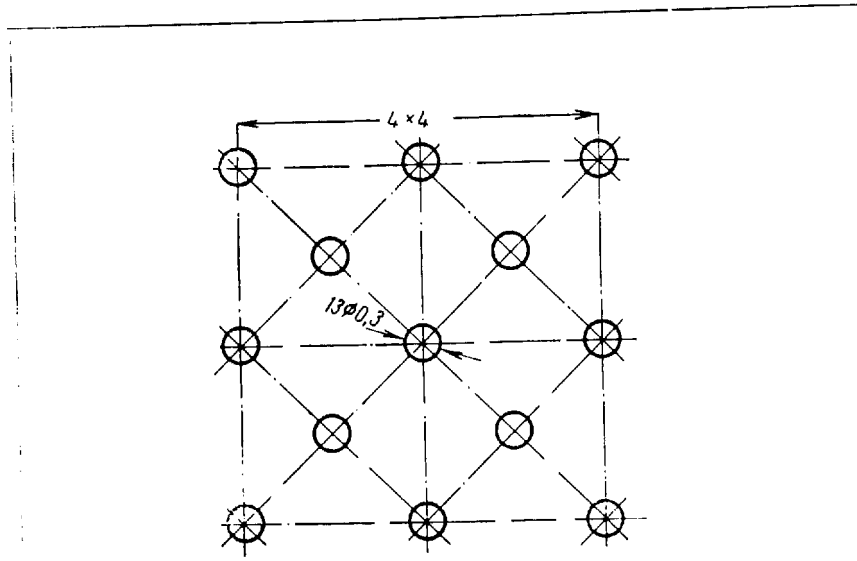


Fig. 3. Schéma du champ photométrique en mosaïque.

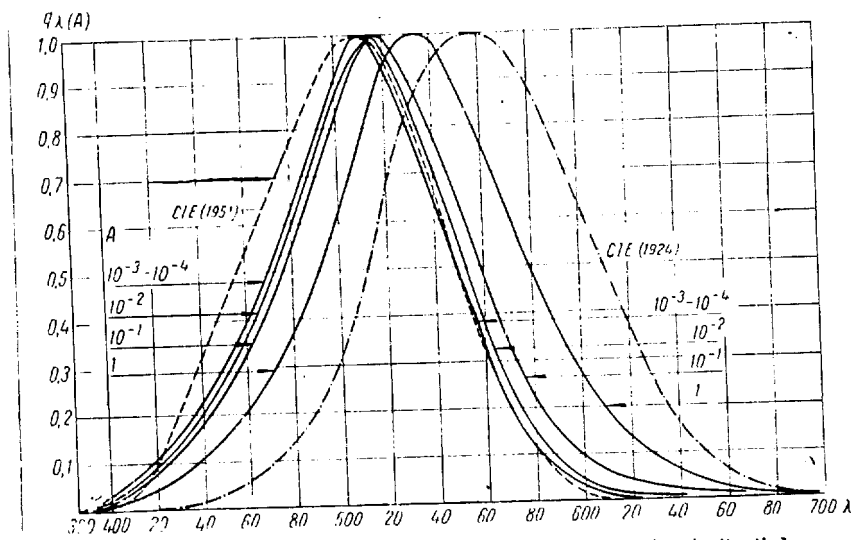


Fig. 4. Courbes représentant la sensibilité spectrale de l'oeil à des niveaux d'adaptation variants de 10^{-4} jusqu'à 1 asb. CIE (1924) — la courbe d'efficacité lumineuse spectrale photopique, adoptée par la CIE. CIE (1951) — la courbe CIE scotopique

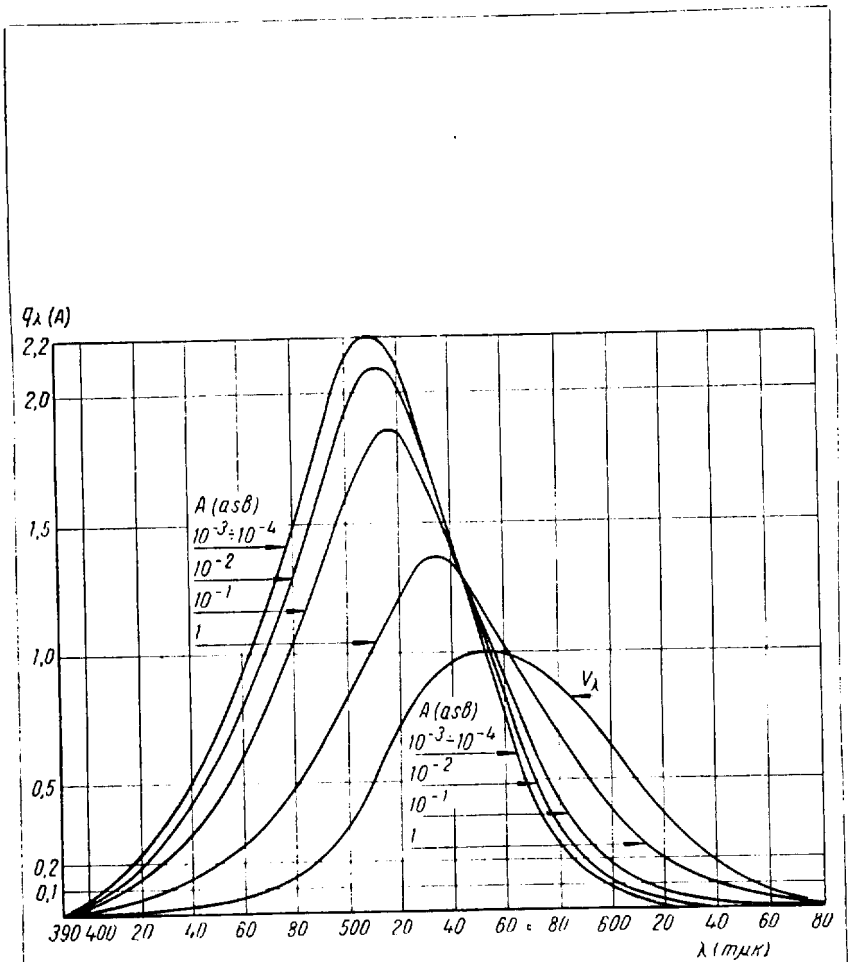


Fig. 5. Courbes des valeurs réduites de la sensibilité spectrale de l'oeil aux différents niveaux d'adaptation. V_λ - la courbe CIE photopique.

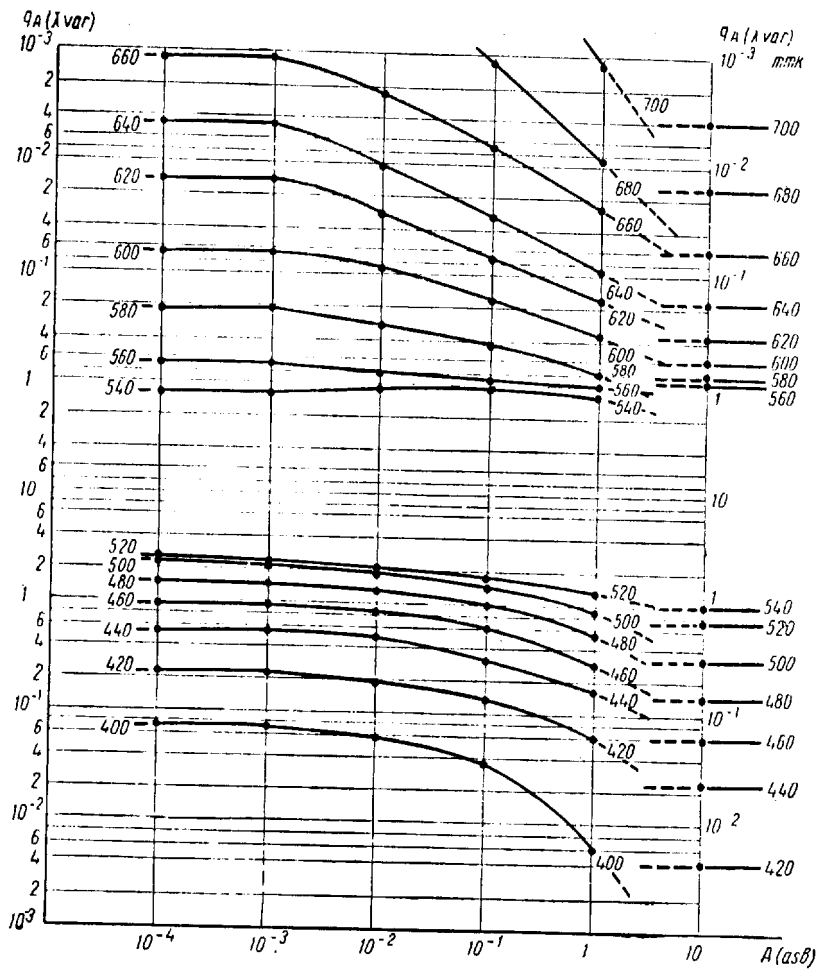


Fig. 6. Courbes représentant la sensibilité spectrale de l'oeil q_A pour les longueurs d'onde λ constantes et désignées à côté de chaque courbe et pour les niveaux d'adaptation variables A (asb).

BIBLIOGRAPHIE

1. Norme Soviétique $\frac{OCT}{BKC}$ 7637.
2. Commission Internationale de l'Eclairage. Recueil des travaux et compte rendu de séances.
Dixième Congrès (1939).
3. Norme Soviétique $\frac{OCT}{BKC}$ 8485.
4. S. MAISEL, «Luminance et chromaticité du point de vue de la physique de la vision dans la rétine». Izvestia Akademiï Naouk SSSR, OTN (Bulletin de la section des sciences techniques de l'Académie des Sciences de l'URSS, n° 5 (1950)).
5. S. YOUROV, «Variations de la sensibilité spectrale de l'œil aux niveaux élevés de luminance». DAN (Comptes rendus de l'Académie des Sciences de l'URSS) (1949), vol. LXVII, n° 2.
6. W. D. WRIGHT, «Modern Problems of Colorimetry». The Proc. of the Physical Soc. sec. B (1951), vol. 64 № 379 B.
7. S. YOUROV, «Sensibilité spectrale de l'œil à un niveau donné de luminance équivalente». DAN (1950), vol. LXXIV, n° 6, p. 1077-80.
8. M. JAGGI, «Beitrag zur Kenntniss der spektralen Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges», Helv. Phys. Acta (1939), № 2, 77-108.
9. A. DRESLER, «The Non-Additivity of Heterochromatic Brightnesses», Trans. of the Illumin. Eng. Soc. (London) (1953), № 6, vol. XVIII, 141-56.
10. Commission internationale de l'Eclairage (1939). Comité d'études sur la photométrie visuelle. Rapport du Secrétariat № 5. Rapporteurs: J. URBANEK et E. FERENCZ.
11. Décisions et recommandations officielles de la Commission Internationale de l'Eclairage (1948), Paris. XIe session.
- 12 a) P. I. BOUMA, «The definitions of brightness and apparent brightness and their importance in road lighting and photometry». Philips technical review, vol. 1, № 5. (1936).
- b) A. GERCHOINE, «Photométrie visuelle dans la région des luminances faibles», DAN (1924), vol. XXXVII, n° 4, 145-6.
- c) A. VOLKENSTEIN et A. GERCHOINE, «Mesures photométriques visuelles aux faibles luminances», DAN (1949), vol. XVI, n° 1.

**COMMISSION INTERNATIONALE
DE L'ÉCLAIRAGE**

COMMUNICATION

**Treizième session
Zurich, 13—22 juin 1955.**

**N. T. FEDOROV
(URSS)**

**Epreuve
Reproduction Interdite**

**QUELQUES RECHERCHES DANS LE DOMAINE
DE LA COLORIMÉTRIE SPÉCIALE**

Par professeur D^r Nicolas FEDOROV,

Académie militaire de médecine. Laboratoire de physique,
Léninegrad

*ILLUMINATION, INTL. COMMISSION ON (CIE) - 13th Plenary
Meeting - Zurich, 13-22 June 55*

QUELQUES RECHERCHES DANS LE DOMAINE DE LA COLORIMÉTRIE SPÉCIALE

N. T. FEDOROV

Académie militaire de médecine

Laboratoire de Physique U.R.S.S. — Léninegrad

Les lois fondamentales et les méthodes de mesure de la colorimétrie générale, basées sur l'identité visuelle des champs confrontés, sont suffisamment connues et appliquées avec certitude. La situation est bien moins favorable dans le domaine de la colorimétrie spéciale basée, d'après E. Schrödinger [1], sur la similitude la plus grande ou la différence à peine perceptible de deux couleurs, ce qui se ramène pratiquement à la détermination des seuils différentiels de la tonalité chromatique, de la luminosité et de la saturation.*

Les recommandations officielles, adoptées en 1939 par le X^e congrès de la CIE, comprennent un appel adressé aux comités nationaux de rassembler des renseignements sur les seuils chromatiques différentiels dans toute la région chromatique du spectre [2].

Ce rapport est un résumé des résultats essentiels que nous avons obtenus avec nos collaborateurs (V. Skliarévitch, M. Youriev, O. Machirova et d'autres) au cours de ces dernières années dans le domaine de la colorimétrie spéciale où nous avons recueilli des données expérimentales nouvelles sur la saturation des couleurs spectrales dans la région des ondes courtes, sur les écarts à la loi de l'additivité des luminances spectrales dans la même région, etc.

* Théoriquement les mesures basées sur les plus grands écarts sont également possibles; cependant en pratique ces mesures ne sont pas utilisées en colorimétrie.

I

La colorimétrie spéciale, qui exige, d'après E. Schrödinger, la connaissance des caractéristiques spectrales des trois récepteurs fondamentaux de l'analyseur visuel ou, ce qui revient au même, la connaissance de l'orientation des trois axes de l'espace chromatique fondamentaux au point de vue physiologique, à l'encontre de la colorimétrie générale ayant trait uniquement aux propriétés affines de cet espace, est basée sur les principes suivants:

La première tâche de la colorimétrie spéciale consiste en l'élaboration d'une mesure quantitative de la similitude ou de la différence de deux couleurs quelconques, de la mesure de la distance qui les sépare dans l'espace chromatique, étant entendu que cette distance doit passer par un minimum lors de l'égalité de luminance de deux couleurs considérées.

Si nous choisissons deux points A et B situés sur une surface quelconque de luminance constante, alors le point B, d'après ce qui vient d'être énoncé, doit être situé plus près du point A que n'importe quel autre point du demi-rayon OB et, inversement, le point A doit être plus près du point B que n'importe quel autre point du demi-rayon OA.

Il est facile de se rendre compte que la géométrie classique euclidienne ne satisfait pas à cette condition. En effet prenons les deux demi-rayons OA et OB (figure 1) qui représentent toutes les valeurs possibles d'intensité des deux couleurs quelconques, c'est-à-dire deux vecteurs de l'espace chromatique, et choisissons sur l'un d'eux une couleur quelconque A'. Alors la couleur «la plus rapprochée» de A' (située le plus près de ce point) sera évidemment la couleur B', et la couleur la plus rapprochée de B', non pas A', mais A''.

Par conséquent on peut caractériser l'élément linéaire de l'espace chromatique, l'élément mesurant le degré de différence de deux couleurs, par l'expression non-euclidienne suivante:

$$dS^2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^3 a_{ik}(x_1, x_2, x_3) dx_i dx_k, \quad (1)$$

où $a_{ik} = a_{ki}$ et par x_1, x_2, x_3 sont désignées les coordonnées de la couleur r, g, b .

Ceci constitue le premier principe de la colorimétrie spéciale.

On peut admettre ensuite que pour deux couleurs à peine différentes, les grandeurs dx_i (et par conséquent les grandeurs ds aussi) doivent être considérées comme des différentiels et que ds possède une valeur égale pour chaque paire de couleurs ainsi définies (deuxième principe de la colorimétrie spéciale).

Enfin, d'après le troisième principe de la colorimétrie spéciale, la distance entre deux couleurs, assez éloignées l'une de l'autre, est déterminée par la longueur ($\int ds$) de la ligne la plus courte (la géodésique) qui réunit ces points. Essayons d'expliquer nettement ces trois principes; pour cela nous considérerons les expressions «également éloignés» et «également différentes» comme des synonymes.

Nous considérons comme également éloignés d'un point quelconque F de l'espace chromatique tous les «points chromatiques» pouvant être à peine différenciés de ce point (deuxième principe). Ils sont tous situés sur la surface d'un certain ellipsoïde minuscule ayant son centre en F (premier principe). Nous considérons également que tous les axes de ces ellipsoïdes ont «la même longueur» (deuxième principe).

Nous obtiendrons pour les plus faibles valeurs de ds des surfaces équidistantes, disposées autour de F, en augmentant dans le même rapport les axes du premier ellipsoïde. Toutes ces surfaces constituent par conséquent des ellipsoïdes semblables au premier et disposés identiquement (deuxième principe). Cette construction euclidienne est valable tant que nous avons affaire à des grandeurs infinitésimales. Pour construire autour du point F une surface éloignée de ce point d'une longueur finie, nous ne pouvons plus procéder en augmentant la longueur des axes de notre ellipsoïde d'un nombre déterminé de fois le long de leur propre direction, mais devons suivre le chemin le plus court selon la conception riemannienne, c. à. d. se déplacer le long des lignes géodésiques par «segments» égaux de l'intégrale $\int ds$, qui sert dans ce cas particulier de mesure de distance (troisième principe).

Il faut ensuite affirmer la validité de la loi de l'additivité des luminances hétérochromes et de la constance de ds , lors des variations proportionnelles de r et dr , g et dg et b et db , pour le spectre en totalité, à tous les niveaux de luminance. En réalité, ces deux postulats ne sont vrais que dans certaines limites. Le premier postulat, comme nous le montrerons plus loin, est vrai

pour la plus grande partie du spectre, de son extrémité rouge jusqu'à env. 480 $m\mu$, et le second pour une région limitée de luminances, aux environs de 100 nits. Ces postulats permettent de choisir la fonction a_{ik} de manière que l'expression pour ds^2 prenne la forme:

$$ds^2 = \frac{1}{l_1\bar{r} + l_2\bar{g} + l_3\bar{b}} \left(\frac{l_1 d\bar{r}^2}{\bar{r}} + \frac{l_2 d\bar{g}^2}{\bar{g}} + \frac{l_3 d\bar{b}^2}{\bar{b}} \right). \quad (2)$$

Ayant déterminé ensuite la condition nécessaire et suffisante d'intégrabilité, et par cela même la possibilité de déterminer l'égalité en tant que luminance de deux couleurs hétérochromes, nous obtiendrons l'expression suivante pour $\int ds$:

$$\int ds = \sqrt{\left(\log \frac{L}{L'} \right)^2 + 4 \left(\arccos \frac{l_1 \sqrt{\bar{r}\bar{r}'} + l_2 \sqrt{\bar{g}\bar{g}'} + l_3 \sqrt{\bar{b}\bar{b}'}}{\sqrt{LL'}} \right)^2} \quad (3)$$

où \bar{r} , \bar{g} , \bar{b} et \bar{r}' , \bar{g}' , \bar{b}' sont les coordonnées chromatiques des couleurs dont la distance dans l'espace chromatique se détermine par la grandeur $\int ds$.

$$L = l_1\bar{r} + l_2\bar{g} + l_3\bar{b}$$

$$\text{et } L' = l_1\bar{r}' + l_2\bar{g}' + l_3\bar{b}'$$

II

En partant de ces principes fondamentaux de la colorimétrie spéciale, nous pouvons trouver aussi l'expression pour la saturation des couleurs spectrales, en la mesurant par la longueur de l'arc de cercle le plus court dans l'espace chromatique non euclidien entre les couleurs spectrales ou blanches de luminance égale.

Dans ce cas, étant donné que $L = L'$ et la luminance du blanc est $L' = (l_1 + l_2 + l_3) r'$, on aura:

$$s = \int ds = 2 \arccos \frac{l_1 \sqrt{\bar{r}} + l_2 \sqrt{\bar{g}} + l_3 \sqrt{\bar{b}}}{\sqrt{(l_1 + l_2 + l_3) L}} \quad (4)$$

Pour calculer la saturation en partant de cette expression nous avons utilisé une des séries (la troisième) des coefficients de distribution fondamentaux que nous avons établis [3].

Les coefficients de \bar{r} , \bar{g} , \bar{b} sont obtenus à partir des coefficients de x_λ , y_λ , z_λ par la méthode indiquée dans l'ouvrage cité plus haut [3].

Les facteurs de luminance l_1 , l_2 et l_3 ont été trouvés égaux à $l_1 = 1$; $l_2 = 2,245$; $l_3 = 0,0031$ respectivement. Les points d'intersection de ces courbes ont été constatés pour $\lambda_1 = 438 \text{ m}\mu$,

$$\lambda_2 = 497 \text{ m}\mu, \lambda_3 = 509,5 \text{ m}\mu \text{ et } \lambda_4 = 571,2 \text{ m}\mu,$$

ce qui correspond, à la marge d'erreurs près, à la position des points particuliers du spectre pour lesquels les couleurs complémentaires et de contraste simultané sont les mêmes [4], ces points sont en même temps conformément à la théorie que nous avons élaborée [5] les points d'intersection des courbes des coefficients de distribution fondamentaux.

Les valeurs numériques de \bar{r} , \bar{g} , \bar{b} sont indiquées dans le tableau I.

Tableau I

Longueur d'onde, $m\mu$	\bar{r}	\bar{g}	\bar{b}
400	3,8	0,0	248,6
410	10,8	0,5	764,4
420	31,7	3,7	2344,9
430	61,1	26,9	5027,7
435	69,0	50,1	5846,8
437	69,0	62,5	6070,8
439	67,2	76,6	6253,5
440	65,0	83,3	6314,8
441	61,9	90,8	6347,8
443	55,4	109,0	6400,9
445	48,9	127,3	6424,5
447	43,6	145,0	6442,1
449	37,7	162,7	6436,2
450	35,2	171,0	6433,7
460	13,3	300,9	6059,4
470	4,7	469,5	4675,2
480	74,3	709,8	2991,4
481	81,3	736,8	2870,4
483	89,6	789,8	2593,4
485	117,9	842,8	2289,2
487	142,6	901,8	2127,5
489	168,6	972,5	1801,2
490	174,1	1012,5	1638,0
491	186,3	1037,3	1607,9
493	224,0	1125,8	1461,7
495	265,2	1220,1	1287,2
497	312,4	1337,9	1143,4
499	412,6	1473,5	1037,3
500	378,6	1526,3	987,2
501	418,5	1591,4	938,3
503	477,4	1738,7	851,1
505	548,1	1897,9	773,3
507	613,0	2045,2	688,4
509	689,6	2227,9	602,4
510	726,0	2318,0	574,0

Longueur d'onde. $m\mu$	\bar{r}	\bar{g}	\bar{b}
511	760,3	2422,4	530,5
513	854,6	2593,4	458,6
515	918,9	2764,3	412,6
520	1225,4	3182,4	284,1
530	1742,3	3750,6	153,0
540	2217,3	4022,2	73,9
550	2655,2	4042,5	31,8
560	3072,3	3856,7	13,9
565	3259,4	3677,9	9,7
567	3330,1	3607,1	8,7
569	3100,8	3518,7	7,8
570	3438,4	3467,8	7,4
571	3465,7	3418,5	7,1
573	3530,5	3306,5	6,7
575	3583,6	3200,1	6,0
580	3708,4	2916,8	5,9
590	3817,1	2275,0	3,9
600	3713,5	1659,4	3,1
610	3362,2	1149,6	1,1
620	2785,6	757,3	0,9
630	2065,5	471,5	0,4
640	1424,9	284,2	0,2
650	896,1	162,7	0,0
660	519,4	89,0	0,0
670	274,7	45,6	0,0
680	146,8	23,9	0,0
690	71,1	11,4	0,0

Le calcul de la saturation des couleurs spectrales exécuté à l'aide de l'expression 4, à partir de ces données, a conduit à des résultats indiqués sur la figure 2.

La comparaison des résultats de ces calculs avec ceux des mesures de la saturation des couleurs spectrales effectués par des auteurs différents [6] ainsi qu'avec nos propres données expérimentales, a permis de constater une concordance satisfaisante de la courbe tracée d'après les résultats des calculs avec la courbe relevée au laboratoire pour les régions rouge, jaune-verte et azur du spectre, c. à d. pratiquement pour toute l'étendue du spectre visible. Ce n'est qu'à partir de la longueur d'onde $\lambda = 480 m\mu$ qu'on constate un écart important d'avec les résultats des essais; cet écart devient particulièrement saillant par suite de l'existence d'un minimum de la courbe $S(\lambda)$ pour $\lambda = 440 m\mu$; ce minimum ne figure pas dans les courbes expérimentales, largement connues, de J. G. Priest et D. G. Brickwedde, se rapportant à cette région particulière du spectre. La plupart des courbes expérimentales ne sont tracées que jusqu'à

450 $m\mu$ ou un peu au-delà. Cependant l'analyse détaillée des résultats mêmes des expériences de J. G. Priest et F. G. Brickwedde [8] montre nettement l'existence d'un deuxième minimum de la courbe de sensibilité dans la région des ondes courtes du spectre (figure 3). Cela nous a incités à entreprendre une étude méticuleuse de la saturation dans cette région du spectre en utilisant pour cela l'appareil de Helmholtz grand modèle pour le mélange des couleurs. L'expérience a été menée dans les conditions suivantes: champs de vision concentriques de 1° et 3° ; une bonne adaptation à la lumière (toutes les mesures ont été effectuées dans une chambre éclairée à la lumière du jour, égale de 100 à 1200 lux au voisinage de l'appareil).

Ces recherches ont été effectuées par V. Skliarévitch et O. Machirova par la méthode de la détermination du premier seuil chromatique à partir du blanc ($\sim 4800^\circ$). L'influence de la lumière diffuse dans l'appareil a été éliminée à l'aide d'un filtre bleu dont la courbe de transmission spectrale a été soigneusement relevée. La saturation des couleurs spectrales a été déterminée comme une valeur inverse de la pureté colorimétrique de la couleur

$$S_\lambda = \frac{1}{P_\lambda} = \frac{L_w + L_\lambda}{L_\lambda}; \quad \log S_\lambda = \log \frac{L_w + L_\lambda}{L_\lambda} \quad (5)$$

où L_w est la luminance du fond blanc et L_λ la luminance de la couleur spectrale pour laquelle le petit champ central devient très peu différent en tant que couleur du champ blanc environnant.

Les résultats obtenus lors de ces recherches ont servi à tracer les courbes des figures 4 et 5, constituant les courbes moyennes de saturation pour chacun des deux observateurs (V. S. et O. M.). Chacune de ces courbes représente la moyenne de 10 séries d'essais effectués le long de toute la région étudiée du spectre (de 410 $m\mu$ jusqu'à 480 $m\mu$) au cours desquels chaque point é tant mesuré dix fois (5 fois lors de l'apparition et 5 fois lors de la disparition de la couleur). Ainsi la saturation spectrale pour chaque longueur d'onde a été déterminée comme moyenne d'arithmétique d'un grand nombre de mesures particulières.

Il résulte de l'examen de ces courbes qu'il existe dans la région des ondes courtes du spectre un deuxième minimum de

saturation des couleurs spectrales, moins prononcé que le premier, situé dans la région de longueurs d'ondes de 425-430 $m\mu$. L'existence de ce second minimum de saturation dans la région des ondes courtes du spectre confirme les résultats des calculs fondés sur les principes de la colorimétrie spéciale. Cependant, l'écart constaté entre la position de ce second minimum conformément aux calculs (440 $m\mu$) et celle qui a été relevée expérimentalement (425—430 $m\mu$), ainsi que la différence entre l'importance de ce minimum prévue par les calculs et celle obtenue expérimentalement — témoignent de la concordance imparfaite de la colorimétrie spéciale et des lois objectives de la vision chromatique. Nous supposons que cette divergence doit être expliquée en premier lieu par les suites de non-validité de la loi d'additivité des luminances dans la région des ondes courtes du spectre pour les stimulus chromatiques, loi prise comme un des principes fondamentaux de la colorimétrie spéciale d'après Schrödinger. Certains travaux concernant ces questions ont déjà mentionné la nécessité de reviser les lois d'additivité et de transitivité quand elles sont appliquées à la photométrie des sources hétérochromes de la lumière (H. Koenig, S. Yourou, H. Piéron, A. Dresler et d'autres) [9, 10, 11].

Étant donné la grande importance théorique et pratique de cette question, V. Skliarévitch et moi-même l'avons étudiée avec une très grande attention.

Nos recherches ont été effectuées à l'aide du grand appareil pour le mélange de couleurs de Helmholtz, dans les mêmes conditions de bonne adaptation lumineuse de l'œil de l'observateur que celles qui existaient lors des mesures de la saturation des champs spectraux. Le champ de vision était circulaire, d'un diamètre angulaire de 2° , divisé en deux par le diamètre vertical. D'abord les deux observateurs ont le plus soigneusement possible relevé par la méthode de comparaison en cascade ($\Delta\lambda = \pm 4 m\mu$ pour toute l'étendue du spectre) les courbes de la répartition de la luminance dans le spectre de l'appareil (chaque point de la courbe du rapport: $\frac{L_{\lambda-\Delta\lambda}}{L_{\lambda+\Delta\lambda}}$ a été obtenu à la suite de 50 mesures et plus).

Ensuite la partie droite et gauche du champ visuel étaient éclairées chacune par une lumière de composition spectrale différente: l'observateur devait les amener à l'identité des lumi-

nances et des couleurs. Ces expériences étaient répétées beaucoup de fois (pas moins de 20) et c'était leurs moyennes qui étaient retenues.

En connaissant les valeurs des luminances relatives L_{λ_1} , L_{λ_2} , L_{λ_3} , L_{λ_4} d'après la courbe de répartition ainsi que les angles β_1 et β_2 de rotation des prismes polarisateurs réglant le pourcentage du mélange réalisé dans les moitiés gauche et droite du champ visuel et les angles α_1 et α_2 des prismes modifiant la luminance intégrale de ces mêmes moitiés, on peut obtenir par voie de calcul les luminances des moitiés droite et gauche du champ photométrique.

Si la loi d'additivité des luminances est valable, l'égalité suivante doit être maintenue (dans des cas particuliers β_1 ou β_2 peuvent être pris égaux à 0° ou 90°):

$$(L_{\lambda_1} \sin^2 \beta_1 + L_{\lambda_2} \cos^2 \beta_1) \sin^2 \alpha_1 = (L_{\lambda_3} \sin^2 \beta_2 + L_{\lambda_4} \cos^2 \beta_2) \sin^2 \alpha_2.$$

Les résultats obtenus sont résumés dans les tableaux ci-dessous:

Tableau II

Observateur					
N. F.			V. S.		
L'	L''	ΔL	L'	L''	ΔL
0,337	0,341	0,004	0,353	0,359	+0,006
0,330	0,334	0,004	0,340	0,379	-0,001
0,352	0,344	-0,008	0,358	0,358	$\pm 0,000$
0,293	0,289	-0,004	0,313	0,314	+0,001

Tableau III

$\frac{L'}{L_{630} + L_{500}} = \frac{L''}{L_{330} + L_{470}}$			Observateur
L'	L''	$\Delta L/L$	
0,0954	0,1031	7,7%	V. S.
0,0631	0,0705	11%	N. F.

Tableau IV

$$L'_{531} + L_{494,5} = L''_{573,2} + L_{460}$$

L'	L''	$\Delta L/L$	Observateur
0,0377	0,1060	8,1%	V. S.
0,0380	0,0988	10,4%	N. F.

Tableau V

Les luminances des deux couleurs complémentaires égalisées au même blanc

λ_1	λ_2	Luminance de la somme	$\Delta L/L$	Observateur
650	495	0,0651	0	V. S.
630	494,5	0,0651	0	
590	487,9	0,0667	2,5%	
575	468,8	0,0632	4,8%	
573,2	460	0,0689	5,8%	
572	418,5	0,0696	6,9%	
590	471,2	0,0565	0	N. F.
575	479,7	0,0582	2,9%	
572	473,3	0,0591	4,6%	
568	458	0,0605	7,1%	

Tableau VI

Vérification de l'additivité dans la région bleue du spectre

L'	L''	Observateur			
		V. S.		N. F.	
		L'	L''	$\Delta L/L$	$\Delta L/L$
$L_{495} = L_{500} + L_{450}$		0,0450	0,0464	3,3%	2,7%
$L_{490} = L_{500} + L_{450}$		0,0334	0,0351	5,0%	5,3%
$L_{480} = L_{500} + L_{450}$		0,0195	0,0207	6,0%	—
$L_{470} = L_{500} + L_{450}$		0,0116	0,0125	7,4%	3,8%
$L_{460} = L_{500} + L_{450}$		0,0060	0,0065	7,9%	7,7%

Au cours de ces essais les luminances étaient modifiées entre 700 et 22 apostibles environ; ce n'est que pour une seule série

($L_{400} = L_{500} + L_{450}$) que les luminances étaient de 11 asb. environ.

La disposition des couleurs choisies et des mélanges réalisés dans le diagramme des couleurs est représentée sur la figure (6).

Afin de donner une idée de la précision des observations effectuées dans la région des ondes courtes du spectre, nous pouvons indiquer que dans une série de 10 opérations d'égalisation il a été constaté que les angles β_1 , α_2 et β_2 étaient déterminés avec une précision largement suffisante (l'angle α_1 demeurait constant au cours de ces essais); en effet:

$$\beta_1 = 72,95^\circ \pm 0,14^\circ; \quad \alpha_2 = 51,29^\circ \pm 0,28^\circ;$$

$$\beta_2 = 62,06^\circ \pm 0,17^\circ;$$

D'après l'expression:

$$\frac{\Delta L''}{L''} = \frac{(I_3 - I_1) \sin 2 \beta_2 \Delta \beta_2}{L_3 \sin^2 \beta_2 + L_4 \cos^2 \beta_2} + \frac{\sin 2 \alpha_2 \Delta \alpha_2}{\sin^2 \alpha_2} \quad (6)$$

on pouvait évaluer l'erreur globale résultante des erreurs de détermination des angles α_2 et β_2 . Cette erreur s'est avérée être de l'ordre de 2%, c. à d. nettement inférieure aux écarts d'additivité que nous avons constatés par ailleurs.

Nous pouvons tirer ainsi les conclusions suivantes:

1. L'additivité se conserve dans de très grandes limites (de 640 $m\mu$ jusqu'à 539 $m\mu$, c. à d. de l'extrémité rouge du spectre jusqu'à la région verte inclusivement) avec une précision moyenne de $\pm 1\%$ environ, qui est évidemment comprise dans la marge d'erreurs de mesure.

2. Les écarts systématiques de la loi d'additivité sont constatés dans la région des ondes courtes du spectre. Dans les mélanges contenant des composantes bleues ($\lambda = 470 m\mu$ et 460 $m\mu$), les écarts d'additivité peuvent atteindre 11%, c. à d. sortir nettement des limites d'erreurs des mesures photométriques.*

La deuxième raison éventuelle de l'insuffisance de précision de la colorimétrie spéciale c'est l'acceptation comme postulat de

* Les recherches effectuées par A. Dresler (11) où il compare par la méthode de papillotement les luminances des flux lumineux colorés non monochromatiques, dont la tonalité était égale à 620 $m\mu$, 585 $m\mu$, 560 $m\mu$ et 504 $m\mu$, et de leurs mélanges deux par deux, à la luminance d'un flux lumineux provenant d'une lampe à vide à tungstène, constatent l'additivité de luminances. Mais ces recherches ne s'étendent malheureusement pas aux régions bleues et violettes du spectre.

la constance de ds lors des modifications proportionnelles de r et de \bar{dr} , de \bar{g} et de dg , de \bar{b} et de db pour n'importe quel niveau de luminance. Les essais ont démontré que le rapport de Fechner $\frac{\Delta L}{L}$ est en réalité une fonction de la luminance et peut être considéré comme constant seulement dans un intervalle de luminances très étroit. Ceci explique ce qui a déjà été constaté par Mac-Adam [12], à savoir que d'après la théorie de Schrödinger, la sensibilité de l'œil ne devait pas dépendre de la luminance, tandis qu'en réalité elle en dépend.

Nous avons réussi à déterminer avec une grande précision pour un protanope et un deutéranope la saturation des couleurs spectrales qui possèdent un point neutre, achromatique dans leur spectre. Ces mesures étaient effectuées par la méthode de la détermination du premier seuil à partir du blanc (pour une apparition à peine perceptible de la couleur); elles ont servi à tracer les courbes de la figure 7.

Nous avons porté sur l'axe des abscisses les

$$\log s = \log \frac{L_w \cdot L_\lambda}{L_\lambda}$$

Afin de pouvoir exprimer la luminance du blanc dans des unités identiques, nous avons procédé comme suit. La luminance du point neutre du spectre (λ_n) était déterminée photométriquement par voie de comparaison avec la luminance du champ blanc environnant (diamètre angulaire 3°). Une fois que la luminance pour cette longueur d'onde était déterminée et connaissant les efficacités lumineuses relatives du dichromate, relevées par la méthode habituelle de comparaison en cascade, on pouvait exprimer les courbes à l'aide des mêmes unités que celles qui sont utilisées dans les courbes pour l'observateur de référence. Ces courbes nous permettent de constater que pour le deutéranope la saturation atteint sa valeur maximum dans la région des ondes courtes du spectre, passe par zéro, augmente à nouveau et prend ensuite l'aspect d'une droite pratiquement parallèle à l'axe des abscisses; la saturation pour le protanope dans cette région à une valeur inférieure que la saturation pour le deutéranope.

Si les principes fondamentaux de la colorimétrie spéciale sont exacts, le même résultat doit pouvoir être obtenu par voie des calculs.

Les calculs étaient effectués pour le protanope en utilisant l'expression suivante:

$$S = 2 \arccos \frac{l_2 \sqrt{\bar{g}} + l_3 \sqrt{\bar{b}}}{\sqrt{(l_2 + l_3) L_n}} \quad (7)$$

et pour le deutéranope:

$$S = 2 \arccos \frac{\frac{l_1 + l_2}{2} \sqrt{\frac{\bar{r} + \bar{g}}{2}} + l_3 \sqrt{\bar{b}}}{\sqrt{(\frac{l_1 + l_2}{2} + l_3) L_g}} \quad (8)$$

autrement dit nous avons admis, conformément à l'hypothèse (3) que pour le protanope, la courbe $r(\lambda)$ est absente et pour le deutéranope il y a congruence des courbes $r(\lambda)$ et $g(\lambda)$ en une seule et unique courbe: $\frac{\bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda)}{2}$.

Les résultats des calculs sont représentés sur la figure 8 qui permet de constater que la colorimétrie spéciale explique dans leur ensemble les résultats obtenus en laboratoire. Il serait opportun de mentionner à cette occasion qu'il n'y a pas longtemps encore A. Chapanis [13] écrivait que l'interprétation des données sur la saturation spectrale pour les dichromates «du point de vue des théories récentes de la couleur était extrêmement difficile, car il n'existe pas à l'heure actuelle d'explication théorique de la cécité aux couleurs permettant la corrélation entre les simples faits de la cécité aux couleurs avec les données que nous possédons sur la vision chromatique normale».

III

Il résulte de la comparaison effectuée d'une façon complètement analogue des données relevées au laboratoire sur la sensibilité de l'oeil aux changements des tonalités avec les courbes théoriques, tracées d'après les principes fondamentaux de la colorimétrie spéciale, que pour la plus grande partie du spectre allant de son extrémité rouge jusqu'à 480 $m\mu$ à peu près, les courbes théoriques coïncident d'une façon plus que satisfaisante avec les données obtenues au cours des essais.

La sensibilité de l'oeil aux changements des tonalités était calculée d'après une expression analogue à celle qui a été établie par P. Bouma et G. Heller [14] en partant des principes fondamentaux de la colorimétrie spéciale.

$$\frac{ds}{d\lambda} = 2 \sqrt{\left(\frac{d}{d\lambda} \sqrt{\frac{l_1 \bar{r}}{L}}\right)^2 + \left(\frac{d}{d\lambda} \sqrt{\frac{l_2 \bar{g}}{L}}\right)^2 + \left(\frac{d}{d\lambda} \sqrt{\frac{l_3 \bar{b}}{L}}\right)^2} \quad (9)$$

A la suite de calculs fastidieux nous avons obtenu la courbe représentée sur la fig. 9. A titre de comparaison nous avons fait figurer la courbe de Wright en traits mixtes sur le même graphique. Dans ce cas-là également on obtient une bonne concordance des résultats théoriques et expérimentaux dans la même région du spectre (680-490 $m\mu$) et des écarts importants pour les longueurs d'ondes inférieures à 490 $m\mu$.

IV

La dernière question se rattachant à la colorimétrie spéciale qui va être examinée ici est celle de la similitude la plus grande, constituant la base même de la photométrie hétérochrome par la méthode de comparaison en cascade.

Schrödinger a indiqué que cette méthode doit démontrer l'indépendance des résultats obtenus de «la voie» suivie, c. à d. autant de la valeur même des différences successives que du fait que nous passons de la couleur donnée à une autre soit par une série de tonalités intermédiaires soit, par exemple, par l'intermédiaire du blanc, sans modification de la tonalité.

Cette exigence de Schrödinger a été vérifiée expérimentalement par Cl. Schäfer pour les couleurs du pigment de l'atlas d'Ostwald [15] et par N. Fédorov et ses collaborateurs, V. Fédorova, A. Plakhov et L. Séletskaya pour les couleurs spectrales [16]. Sur la figure 10 sont représentées les courbes de la répartition spéciale des luminances relevées par l'un de ces observateurs, pour les $\Delta\lambda$ égales à 2, 4, 6 et 8 $m\mu$ respectivement. Ces courbes montrent que les résultats obtenus sont pratiquement indépendants des valeurs des différences.

Nous avons relevé à maintes reprises pour tous les observateurs ayant pris part aux présentes recherches, tant trichromates normaux que dichromates, les courbes des efficacités lumineuses relatives dans les conditions standardisées (champ de 2°, luminance aux extrémités du spectre visuel égal à 12 asb au minimum, bonne adaptation à la lumière, etc.). Les données que nous avons ainsi obtenues démontrent la nécessité d'apporter à la courbe de référence actuelle de $V(\lambda)$ des corrections dans la région des ondes courtes du spectre. Afin d'éliminer l'influence

de la lumière diffuse dans la zone de 430 à 500 $m\mu$, nous avons utilisé un filtre bleu qui éliminait la lumière diffuse des ondes plus longues, particulièrement gênante dans cette région du spectre, puisque l'oeil y est plus sensible qu'à la lumière bleue ou violette. Pour pouvoir transformer les courbes de répartition spectrale de luminance en courbes des efficacités lumineuses relatives $V(\lambda)$, il était nécessaire de déterminer avec toute la précision possible la répartition d'énergie (en unités arbitraires) dans le faisceau lumineux sortant du collimateur de notre appareil. Nous avons effectué ces mesures à l'aide d'une cellule photoémissive à antimoine — caesium avec un amplificateur en courant continu monté en pont, ce qui assure le maximum de stabilité de fonctionnement à l'installation et un faible déplacement du zéro du galvanomètre.

Les résultats relevés par 4 observateurs ainsi que les données de référence de la CIE sont reproduits dans le tableau VII et sur la figure 11; les données moyennes des 4 observateurs sont indiquées par des croix.

Tableau VII

Sensibilité spectrale relative de l'oeil

$\lambda\lambda$ en $m\mu$	Observateurs				Moyenne pour les 4 observateurs	Courbe de référence de la CIE
	N. F.	V. S.	M. Y.	O. M.		
430	0,033	0,031	0,036	0,038	0,035	0,0116
440	0,042	0,051	0,050	0,053	0,049	0,023
450	0,059	0,070	0,065	0,063	0,064	0,038
460	0,083	0,091	0,078	0,076	0,082	0,060
470	0,111	0,132	0,107	0,114	0,116	0,091
480	0,137	0,183	0,151	0,156	0,157	0,139
490	0,191	0,244	0,209	0,199	0,211	0,208
500	0,281	0,331	0,315	0,284	0,304	0,323
510	0,443	0,493	0,485	0,481	0,476	0,503
520	0,673	0,729	0,722	0,700	0,706	0,710
530	0,842	0,891	0,902	0,866	0,875	0,862
540	0,948	0,975	0,980	0,968	0,968	0,954
550	0,996	0,997	1,000	0,996	0,997	0,995
560	0,998	0,998	0,975	0,978	0,987	0,995
570	0,979	0,951	0,913	0,912	0,939	0,952
580	0,901	0,850	0,810	0,802	0,841	0,870
590	0,811	0,728	0,700	0,684	0,731	0,757
600	0,685	0,618	0,593	0,572	0,617	0,631
610	0,548	0,477	0,482	0,450	0,460	0,503
620	0,409	0,362	0,368	0,331	0,368	0,381
630	0,288	0,259	0,260	0,297	0,259	0,265
640	0,187	0,171	0,170	0,145	0,168	0,175
650	0,113	0,110	0,102	0,087	0,103	0,107
660	0,063	0,058	0,057	0,048	0,056	0,061
670	0,033	0,029	0,029	0,024	0,029	0,032

Il est facile de constater que dans la région des ondes courtes du spectre toutes les courbes relevées sont situées au-dessus de la courbe de la CIE.

Il est nécessaire de signaler également une autre particularité importante de la courbe de l'efficacité lumineuse relative de l'oeil qui malheureusement n'a pas été jusqu'ici représentée sur la courbe de référence de la CIE. Tous les observateurs utilisant comme nous l'avons fait la méthode de comparaison en cascade

ont obtenu une courbe du rapport $\frac{L_{\lambda} - \Delta\lambda}{L_{\lambda} + \Delta\lambda}$ avec des bosses

caractéristiques dans la région des ondes courtes du spectre. Ceci peut être expliqué, comme nous l'avons indiqué encore en 1928: «premièrement par l'absorption sélective de la lumière par la tache jaune et par d'autres milieux de l'oeil, et deuxièmement par la fluorescence des milieux de l'oeil causée par les rayons bleus et violets» [17].

Ces bosses apparaissent nettement sur les courbes relevées par chaque observateur, ainsi que sur la courbe moyenne (cf. courbe de fig. 2 le long des axes des ordonnées de laquelle sont portées les valeurs de $-\frac{\Delta \log V}{\Delta \lambda}$); ces bosses devraient être portées sur la courbe $V(\lambda)$ qui sera adoptée par la session prochaine de la CIE.

V

Schrödinger lui-même écrit que sa théorie n'est qu'une première approximation à la réalité, en particulier puisqu'elle admet la constance du rapport de Fechner et parce qu'elle ne peut pas expliquer le phénomène Bezold-Brücke de la modification de la tonalité lors de la modification de luminance [18]. D. MacAdam en a également parlé dans une de ses publications récentes (1954) [12]. Cependant on peut expliquer quantitativement la modification constatée de la tonalité lors de la modification de la luminance en admettant que dans le domaine de la colorimétrie spéciale la tonalité est déterminée non pas par le rapport $\frac{x_1 - x_3}{x_2 - x_3}$ où x_1 est la plus grande des coordonnées trichromatiques r, g, b et x_3 en est la plus petite, mais par l'expres-

sion suivante:

$$\eta = \frac{\log(x_1 - x_3)}{\log(x_2 - x_3)}$$

qui devient, lors de la modification de la luminance égale à n fois sa valeur initiale:

$$\eta' = \frac{\log(x_1 - x_3) n}{\log(x_2 - x_3) n} = \frac{\log(x_1 - x_3) + \delta}{\log(x_2 - x_3) + \delta}$$

où $\delta = \log n$,

ce qui n'est pas égal à η pour toute la longueur du spectre, sauf pour quatre points «spéciaux» correspondant aux points d'intersection des courbes R, G, B (19).

Conclusions

1. L'existence du deuxième minimum de saturation des couleurs spectrales dans la région de 425-430 $m\mu$ a été établie expérimentalement.

2. Les écarts importants de la loi de l'additivité des luminances spectrales ont été constatés dans la région des ondes courtes du spectre.

3. La colorimétrie d'après Schrödinger considérée comme première approximation à la réalité, donne une bonne concordance avec les résultats expérimentaux pour toute l'étendue du spectre visible de son extrémité rouge jusqu'à 480 $m\mu$ environ, c. à d. pour toute la région où la loi de l'additivité de luminances est valable.

4. Les efficacités lumineuses relatives de référence doivent tenir compte des particularités déterminées par les propriétés optiques des milieux de l'oeil.

BIBLIOGRAPHIE

1. E. Schrödinger *Ann. d. Physik*, 63, 489, 1920.
2. CIE (Recueil des travaux et comptes rendus des séances), 3, 1939.
3. N. Fédorov, M. Youriev, V. Skliarévitch et O. Machirova. «Problèmes de l'optique physiologique», v. 8, 1953, p. 99. URSS.
4. Ibid, v. 8, p. 75, 1953.
5. N. Fédorov. Comptes rendus de l'Académie des Sciences de l'URSS. 1949, p. 67, 455.
6. Mac-Adam. (*JOSA*), 32, 247, 1942.
7. N. Fédorov, V. Skliarevitch et O. Machirova.** 1949, p. 67, 267.
8. J. G. Priest and F. G. Brickwedde. *JOSA* 28, 133, 1938.
9. H. Koenig. *Rev. Opt.* 27, 551, 1948.
10. H. Pieron. *C. R. Ac. Sc. Paris*, 214, 1012, 1942.
11. A. Dresler. *Trans. of Illumin. Eng. Soc. (London)*, 18, 141, 1953 et *Das Licht* 7, 203, 1937.
12. D. Mac-Adam (*JOSA*) 44, 713, 1953.
13. A. Chapanis. *J. Exp. Psych.* 31, 24, 1944.
14. P. Bouma, A. G. Heller. *Proc. Kon. Akad. Wet., Amsterdam*, 38, 258, 1935.
15. Cl. Schäfer. *Zeitschr. f. Phys.* 26, 58, 908, 1925.
16. N. Fédorov, V. Fedorova, A. Plakhov et L. Séletskaia.** 3, 5, 1949
17. N. Fédorov et V. Fédorova. *Zeitschr. f. Physik*, 57, 855, 1928.
18. E. Schrödinger. *Zeitschr. f. Physik*, 1, 459, 1920.
19. N. Fédorov, V. Skliarévitch, O. Machirova.* 67, 267, 1949.

* Comptes rendus de l'Académie des Sciences de l'URSS.

** Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS, Série physique.

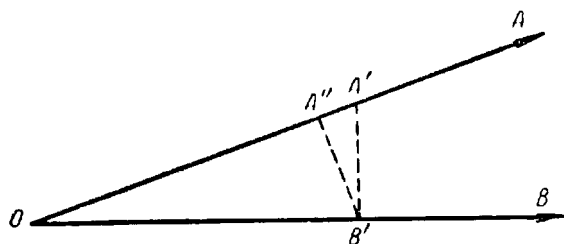


Fig. 1. Deux interprétations possibles du seuil dans l'espace chromatique. Voir le texte pour les explications.

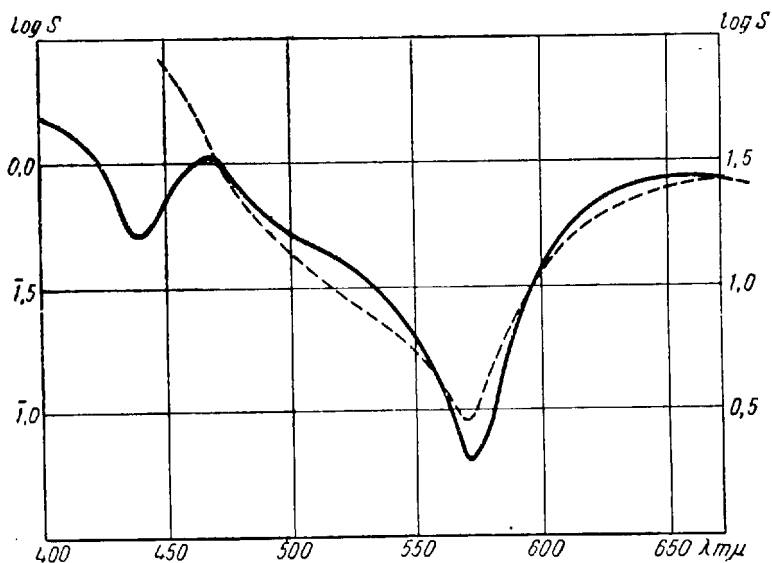


Fig. 2. Saturation des couleurs spectrales; la courbe en trait plein est tracée d'après l'expression (4). La courbe en traits mixtes est tracée par D. Mac-Adam [6], d'après les données expérimentales communiquées par plusieurs auteurs. Les ordonnées donnent la valeur du logarithme de la saturation.

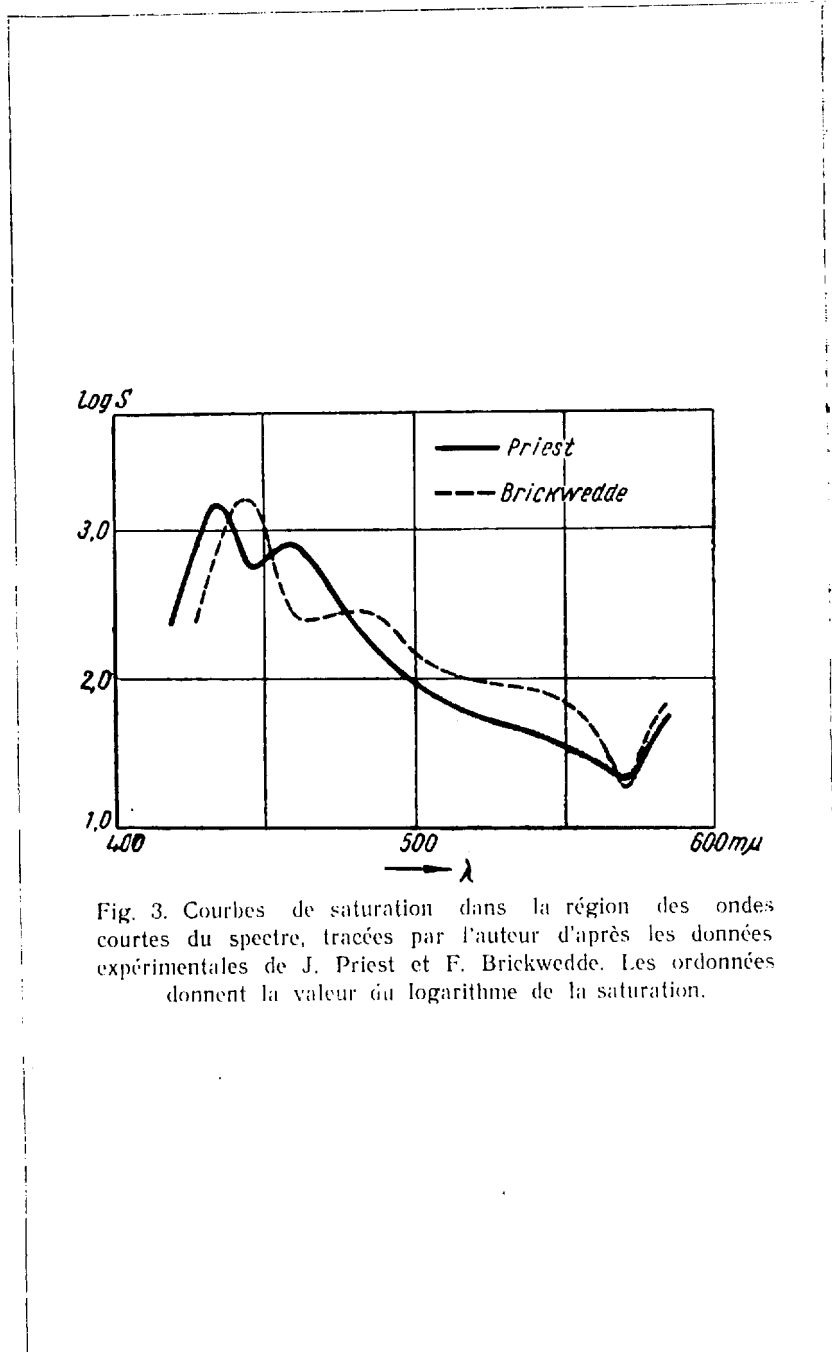


Fig. 3. Courbes de saturation dans la région des ondes courtes du spectre, tracées par l'auteur d'après les données expérimentales de J. Priest et F. Brickwedde. Les ordonnées donnent la valeur du logarithme de la saturation.

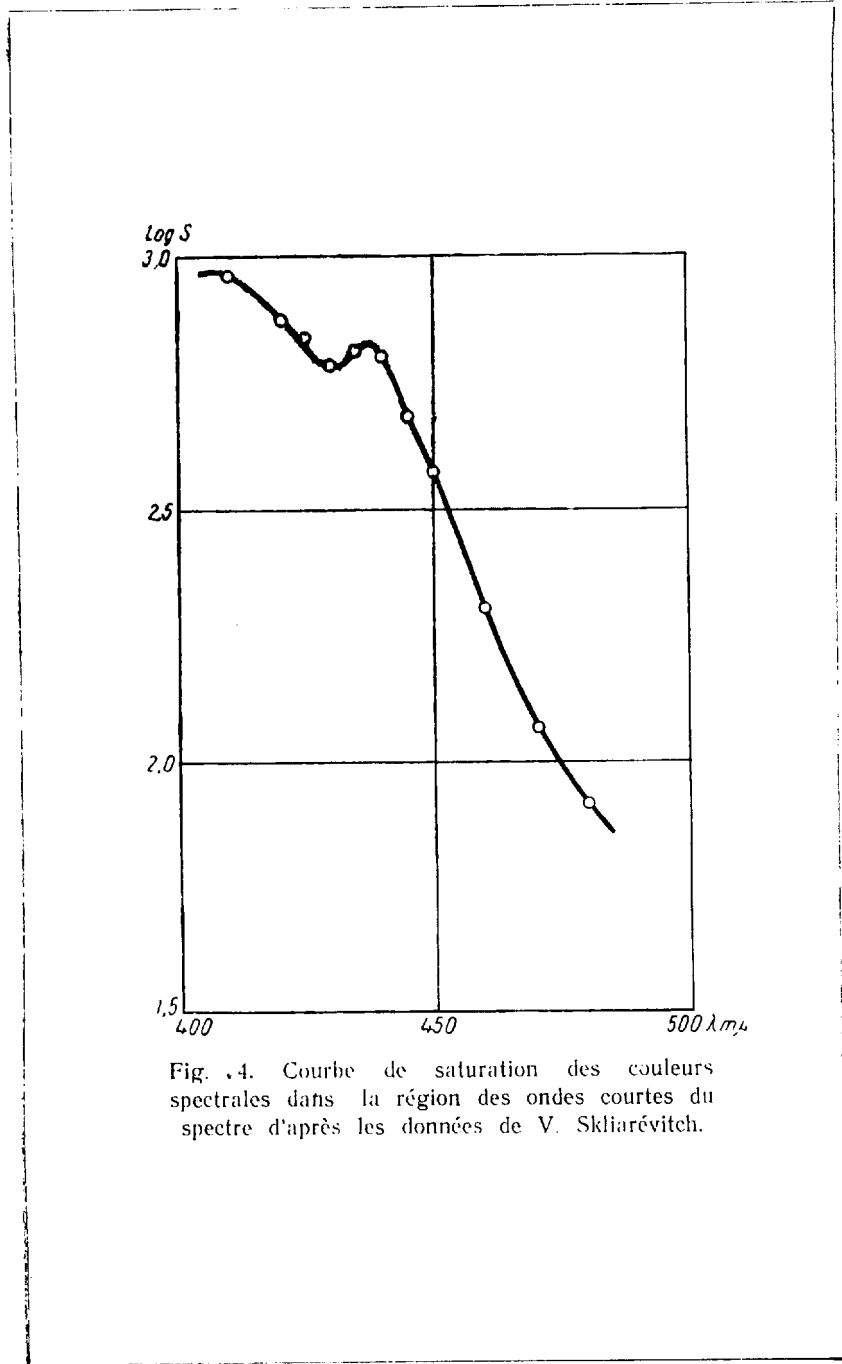


Fig. 4. Courbe de saturation des couleurs spectrales dans la région des ondes courtes du spectre d'après les données de V. Skliarévitch.

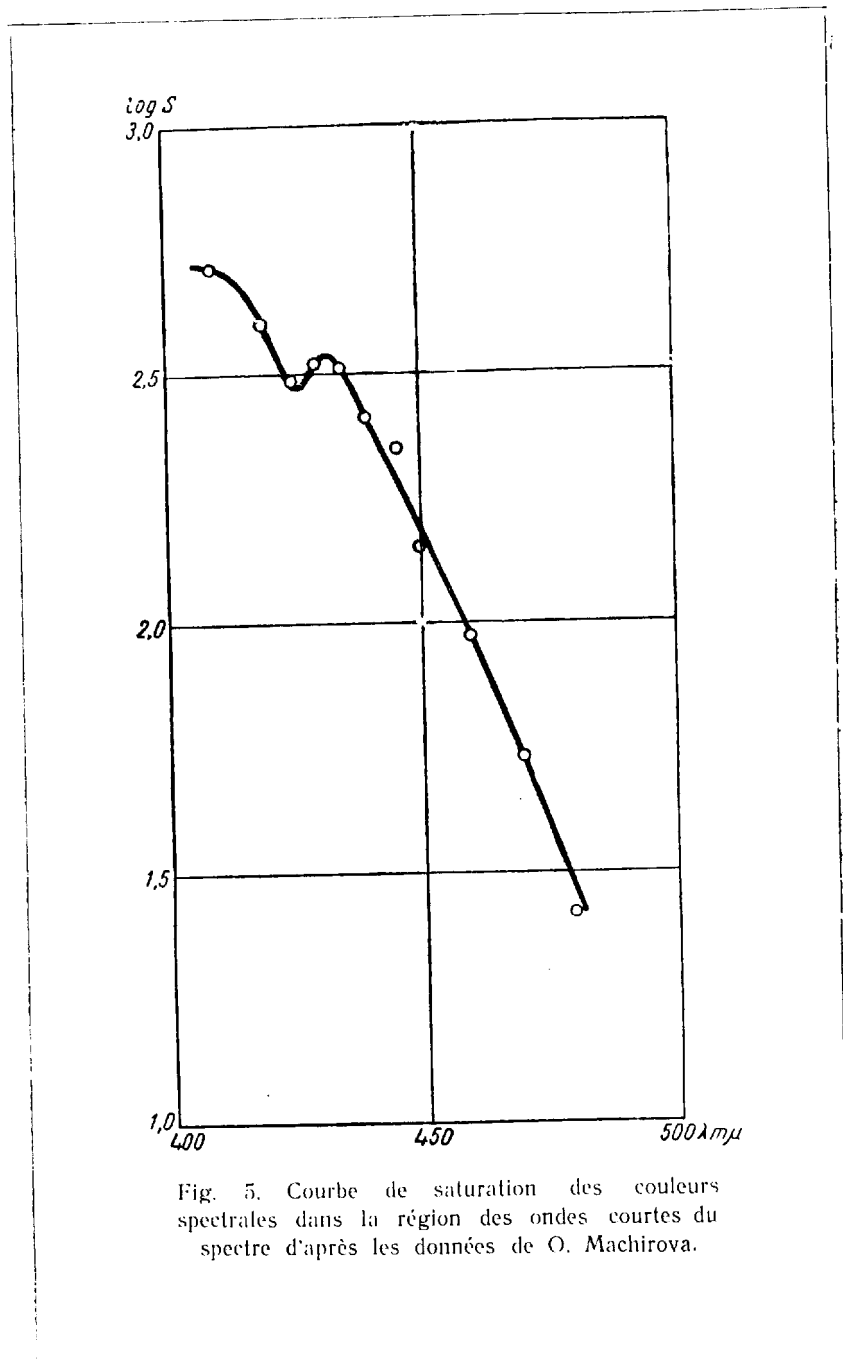


Fig. 5. Courbe de saturation des couleurs spectrales dans la région des ondes courtes du spectre d'après les données de O. Machirova.

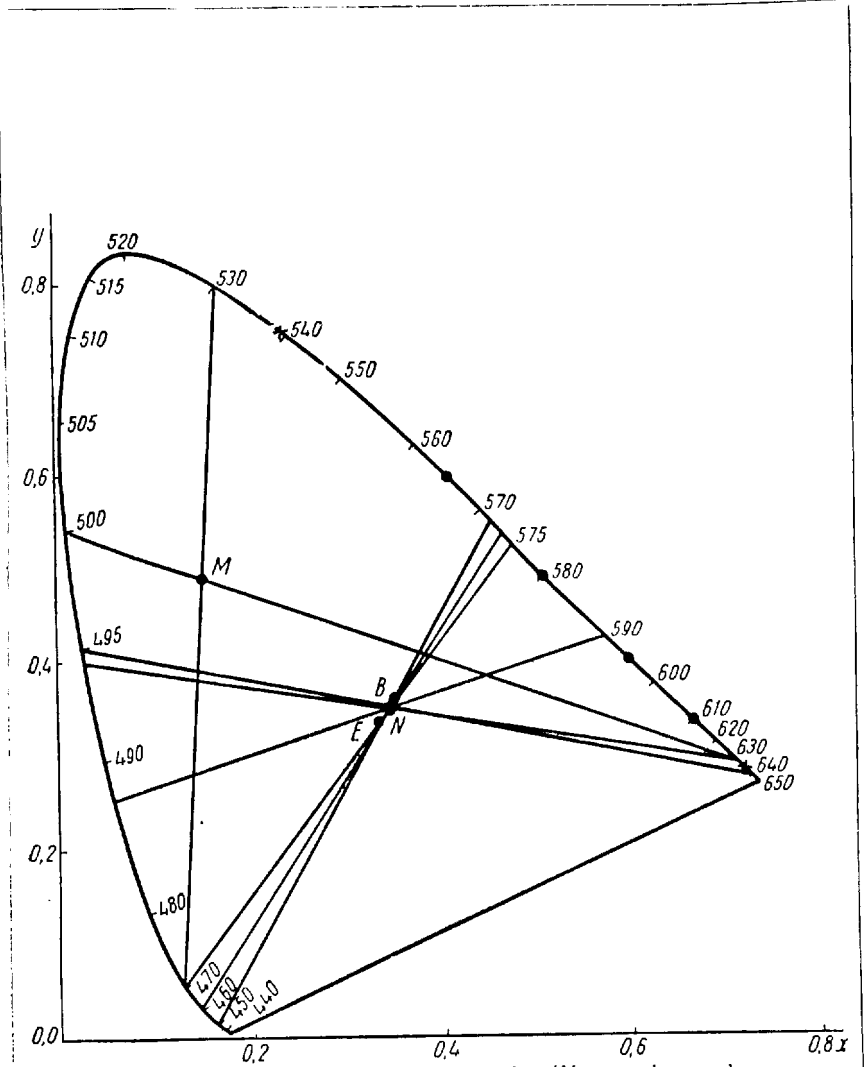


Fig. 6. La disposition dans le diagramme de référence des couleurs pour lesquelles la loi d'additivité a été vérifiée.

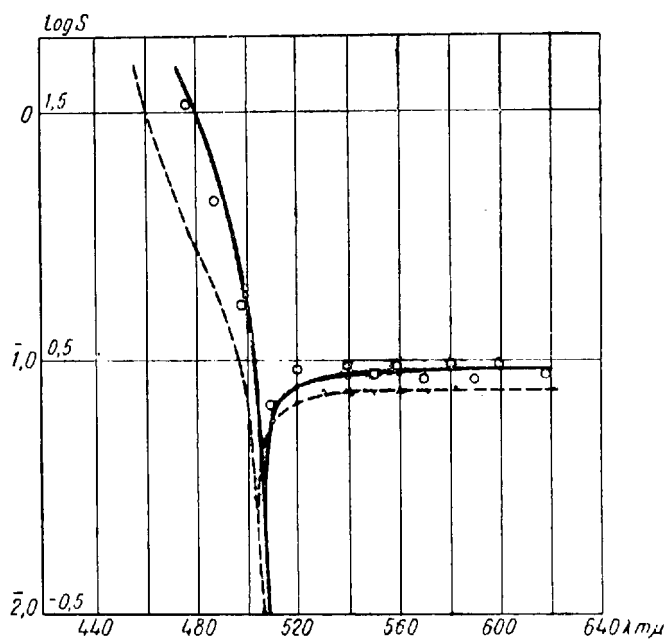


Fig. 7. Courbes de saturation des couleurs spectrales pour le protanope (courbe en traits mixtes) et pour le deutranope (courbe en traits pleins) d'après les essais au laboratoire

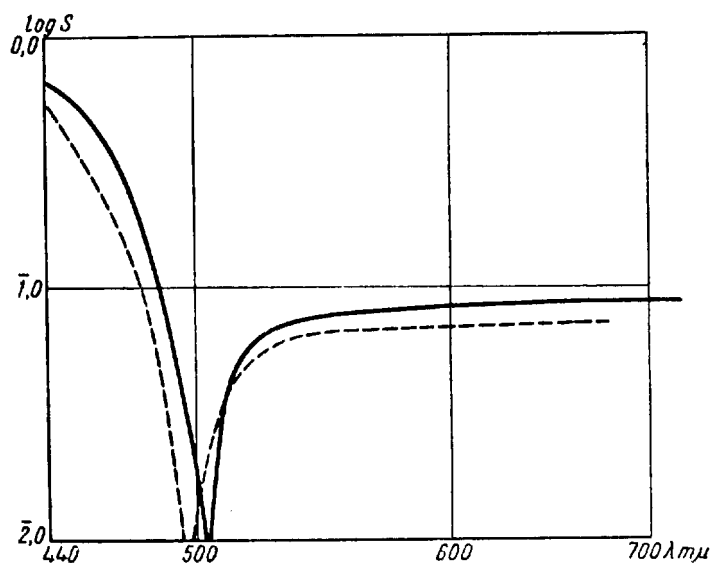


Fig. 8. Courbes de saturation des couleurs spectrales pour le protanope (courbe en traits mixtes) et pour le deutéranope (courbe en traits pleins) établies en partant des expressions (7) et (8).

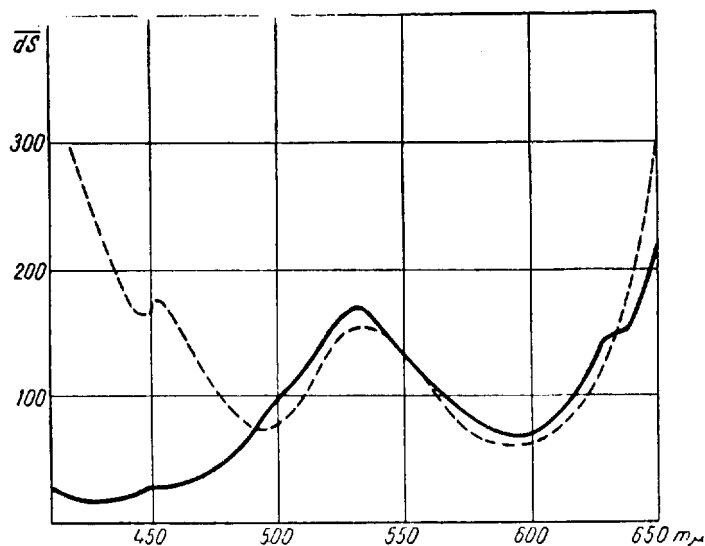


Fig. 9. Sensibilité de l'oeil aux modifications de la tonalité (la courbe en traits pleins est établie d'après l'expression (9) et la courbe en traits mixtes d'après les résultats des mesures effectuées par W. D Wright). Les données représentent les sensibilités relatives.

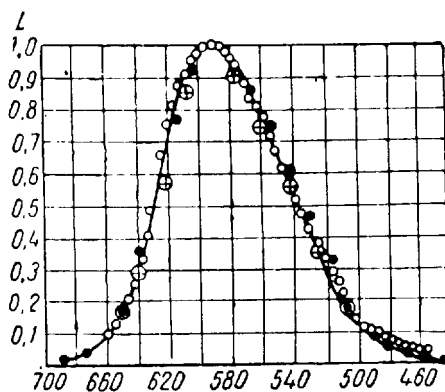


Fig. 10. Vérification de l'indépendance des résultats de mesure de la distribution de la luminance le long du spectre, par la méthode de comparaison en cascade, de la valeur des différences utilisées. $\Delta\lambda = 2 m\mu - 0$; $\Delta\lambda = 4 m\mu$ - courbe en traits pleins; $\Delta\lambda = 6 m\mu$ et $\Delta\lambda = 8 m\mu$ -

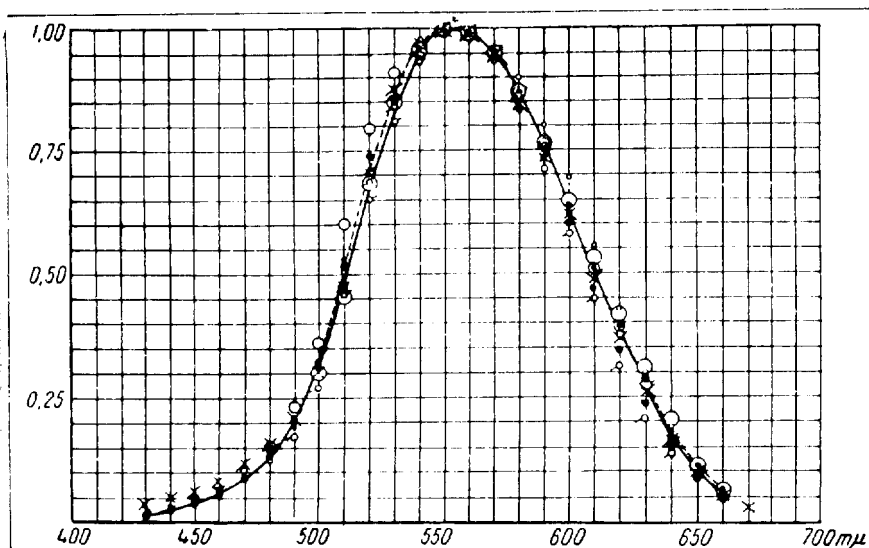


Fig. 11. Courbe des efficacités lumineuses relatives moyennes pour 4 observateurs permettant de constater l'existence des écarts systématiques dans la région bleu-violet du spectre entre cette courbe et celle de référence de la CIE.

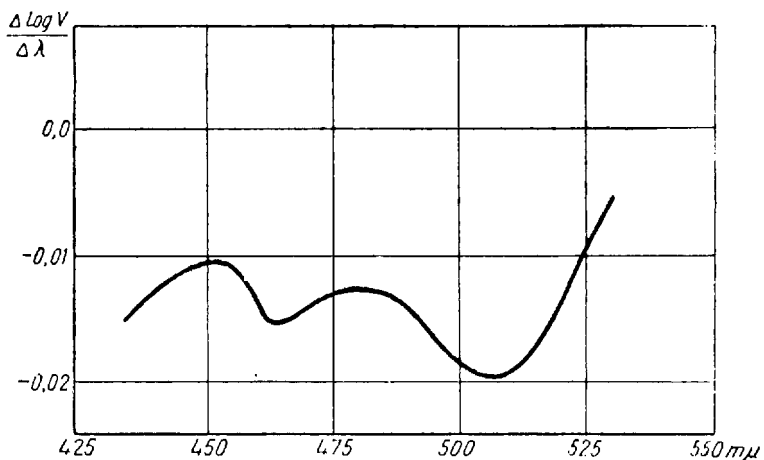


Fig. 12. Bosses caractéristiques de la courbe (moyenne pour 4 observateurs) indiquant la vitesse des modifications des efficacités visuelles relatives dans la région des ondes courtes du spectre; ces bosses s'expliquent par l'absorption de la lumière par la tache jaune de l'oeil et vraisemblablement par la fluorescence des milieux de l'oeil.