

ASSOCIAZIONE OTTICA ITALIANA - FIRENZE  
ISTITUTO NAZIONALE DEL COLORE - PADOVA  
CENTRE D'INFORMATION DE LA COULEUR - PARIGI

**ACTES DES VII<sup>mes</sup>**  
**JOURNEES INTERNATIONALES**  
**DE LA COULEUR**

**2 - 7 Mai 1963**

**FIRENZE** - ASSOCIAZIONE OTTICA ITALIANA  
**PRATO** - AMMINISTRAZIONE COMUNALE  
**PADOVA** - FIERA INTERNAZIONALE

ASSOCIAZIONE OTTICA ITALIANA - FIRENZE  
ISTITUTO NAZIONALE DEL COLORE - PADOVA  
CENTRE D'INFORMATION DE LA COULEUR - PARIGI

**Atti delle VII<sup>e</sup>**  
**Giornate Internazionali**  
**del Colore**

***2 - 7 Maggio 1963***

**FIRENZE - ASSOCIAZIONE OTTICA ITALIANA**  
**P R A T O - AMMINISTRAZIONE COMUNALE**  
**PADOVA - FIERA INTERNAZIONALE**

La VII Edizione delle Giornate Internazionali del Colore ha avuto inizio nella incomparabile cornice del Salone dei Duecento in Palazzo Vecchio a Firenze, gentilmente messo a disposizione dal Sindaco La Pira, che ha completato l'ospitalità in una sede così prestigiosa non soltanto col suo saluto, ma anche con un sontuoso rinfresco. Ciò avveniva il 2 Maggio 1963.

Firenze, con le sue dolci sfumature di colore in una radiosa giornata di maggio, si presentava così come una sede ideale per trattare problemi relativi alla natura del colore e alle sue applicazioni nel campo artistico. Gli studi di natura scientifica in questo campo non potevano trovare accoglienza migliore di quella che poteva offrire la Città sede dell'Associazione Ottica Italiana, e dell'Istituto Nazionale di Ottica, nonché di tante raccolte famose di opere pittoriche, che costituiscono un vero trionfo del colore.

La Società Leonardo da Vinci, nello storico Palazzo Corsini, ospitò i lavori delle "Giornate" nel pomeriggio del 2 e nel mattino del 3 Maggio; la Galleria degli Uffizi offrì uno sfondo impareggiabile alle discussioni che ebbero luogo nel pomeriggio del 3 Maggio, proprio sui problemi che riguardano la valorizzazione dei colori nelle esposizioni di opere d'arte.

La giornata ebbe la sua degna conclusione la sera con la splendida proiezione del Dott. Mario Carafoli su "Il corso dell'Arno" e su "Volterra e il suo segreto", ambedue così appropriate all'atmosfera d'arte e di colore creatasi a Firenze.

Il Sindaco Giovannini di Prato accolse signorilmente i Congressisti negli antichi Palazzi che formano un gioiello nel centro di quella Città, famosa per la sua grande industria tessile. I lavori svolti in questa sede, circa l'influenza determinante del colore in un'industria, come quella di Prato, furono coronati da una succolenta colazione offerta dal Municipio. Una visita ad alcuni stabilimenti concluse la giornata di Prato. Dopo una deliziosa corsa sull'Autostrada del Sole, nel magnifico tratto appenninico, i congressisti raggiunsero la Città di Padova a sera inoltrata.

La mattina della Domenica 5 Maggio i pullmann speciali hanno portato i congressisti a Venezia, dove un vaporetto particolare era ad attenderli. La visita all'Isola di Torcello, nel caratteristico ambiente veneziano, in una giornata piena di sole ha costituito un godimento incomparabile. La visita poi all'Isola di Burano, coi suoi merletti famosi, e con una colazione intonata alle tradizioni del luogo, e poi la visita all'Isola di Murano, con

*dimostrazioni pratiche della straordinaria abilità dei maestri nel creare dei capolavori di arte vetraria, hanno riempito la giornata di interesse e di piacere. I pullmann hanno riportato la sera stessa a Padova i partecipanti.*

*La Fiera di Padova ha accolto la mattina del 6 Maggio i Congressisti nel Salone dei Congressi. Ha porto il Saluto il Presidente Merlin, che già aveva chiarito, nella seduta inaugurale di Firenze, l'interesse che la Fiera di Padova, attraverso l'Istituto Nazionale del Colore da essa istituito alcuni anni or sono, ha dimostrato verso i problemi del colore nelle manifestazioni più pratiche ed applicative. Un cordiale rinfresco offerto dalla Fiera stessa ha concluso i lavori della mattinata.*

*Dopo una interessantissima visita alle innumerevoli bellezze della città, i lavori sono stati ripresi nel pomeriggio; la sera l'amministrazione Comunale della Città ha offerto un sontuoso pranzo freddo nello storico Caffè Pedrocchi, e una meravigliosa proiezione a colori, nel Palazzo dei Congressi della Fiera, per opera della Kodak, ha chiuso la giornata.*

*La mattina del 7 Maggio i lavori si sono conclusi, col saluto del Prof. Yves Le Grand, Presidente del Centre d'Information de la Couleur di Parigi.*

*Questo Centre, infatti, di concerto con l'Associazione Ottica Italiana di Firenze, e con l'Ente della Fiera di Padova, aveva collaborato alla VII edizione delle "Giornate Internazionali del Colore", che costituiscono una sua iniziativa.*

*Nelle pagine che seguono sono riportati, quasi al completo, i testi delle relazioni e delle comunicazioni presentate e discusse a Firenze, a Prato e a Padova dal 2 al 7 Maggio 1963.*

## ALLOCUTION

YVES LE GRAND

Président du Centre d'Information de la Couleur - Paris, France

Monsieur le Maire de Florence, Mesdames, Messieurs,

Permettez-moi d'abord de remercier la Municipalité de Florence pour l'accueil si fastueux qu'elle nous a réservé dans cette magnifique salle, si pleine de souvenirs historiques. Ces oriflammes aux vives couleurs sont bien de mise pour inaugurer ces journées qui doivent honorer la couleur, et ces appels de trompette nous rappellent que musique et couleur ont toujours fait bon ménage, depuis ce temps lointain où le Père Castel, en 1740, avait proposé un parallèle entre les couleurs « primitives », le bleu, le jaune et le rouge, et les notes do, mi et sol, et matérialisé cette idée dans un « clavecin oculaire » qui amusa un moment Diderot.

Nous sommes heureux d'être à Florence, d'abord parce que c'est une ville d'art incomparable et qu'elle représente, dans la peinture notamment, un moment où la couleur a pris une importance spéciale. Dans les Journées de travail qui s'ouvrent, les problèmes de présentation des musées, le travail conjoint de la lumière et de la couleur, sera un thème de nos réflexions et quelle ville pouvait s'y prêter mieux que Florence?

Mais Florence n'est pas seulement une ville d'art et une ville où règne le soleil; l'époque décrite par Anatole France dans le « Lys rouge », ce lys qui symbolise cette belle ville, est bien révolue: les vieilles anglaises poitrinaires ne viennent plus mourir ici; d'abord parce que la médecine a fait des progrès, ensuite parce que les anglaises d'aujourd'hui sont toutes, évidemment, jeunes et charmantes. Certes Florence est restée une ville où il fait bon vivre, mais elle n'est pas que cela. Elle s'est considérablement développée dans le sens moderne et industriel et si les amateurs du passé le regrettent parfois, ils ont tort car on ne peut freiner le progrès moderne, et dans ce progrès la couleur encore joue un grand rôle: seconde raison pour nous réjouir d'être ici.

Il y a une troisième raison qui m'est personnelle et que je voudrais vous faire partager: je possède ici un vieil ami, le Professeur Ronchi, qui dirige l'institut national d'Optique de cette ville. Quand je dis vieil ami, ce n'est pas une allusion à notre âge, nous sommes jeunes tous deux, bien entendu, mais à la fidélité de notre amitié. Le Professeur Ronchi, entouré de ses charmantes filles et de toute l'équipe de l'Institut d'Optique, s'est donné beaucoup de mal pour organiser ces Journées. Il en sera récompensé par leur succès, certainement, et en tous cas je voulais lui dire

tout de suite nos affectueux remerciements, en mon nom personnel et en celui de tous les congressistes.

Et pour finir je salue bien cordialement nos amis qui sont venus de divers coins de l'Europe — et même de beaucoup plus loin, du Japon par exemple — pour travailler avec leurs collègues italiens et français. Que ces journées soient fécondes, non seulement sur le plan du travail, mais aussi pour sceller une fois de plus cette fraternité des scientifiques et des techniciens de la couleur du monde entier.

## ALLOCUZIONE

LUIGI MERLIN

Presidente della Fiera Campionaria di Padova, Italia

Signori,

gli uomini di scienza e di esperienza che hanno dato la loro adesione a queste ed alle passate Giornate Internazionali del Colore, hanno indicato le innumerevoli strade che devono essere percorse affinché la scienza del colore possa avere una sua ben delimitata fisionomia e possa quindi dare le sue risultanze sul terreno della pratica. È mia convinzione che questo assieme di studi darà modo ai partecipanti di gettare le basi per un grande lavoro futuro.

Qualcuno di lor Signori da tempo va effettuando studi molto severi e molto positivi sul colore in rapporto alla psicologia, alla pedagogia, alla medicina, altri hanno portato l'indagine sulle applicazioni in altri settori di attività, altri ancora hanno esaminato le influenze del colore in rapporto alla produttività industriale.

Ora, alla luce di tutte le premesse scaturite nei periodici incontri, non è soltanto alla definizione dei mezzi, alla codificazione dei nuovi sistemi, cui si deve attraverso questi annuali convegni tendere, ma a conoscenze che divengano in breve pratiche nuove.

Noi sappiamo bene che nessuna urgenza — senza dubbio nociva alla positività delle conclusioni — dobbiamo avere: si tratta di sortire mezzi eccezionalmente nuovi, si tratta di sovvertire pratiche e costumi secolari e forse addirittura millenari, si tratta ancora di avere il coraggio oltreché di progredire, anche di regredire fino magari alle fonti stesse dell'umanità primigenia.

Poiché, Signori — e questo è forse l'aspetto più affascinante della loro fatica — è nella natura che si troveranno tante soluzioni, nella natura provvida, generosa, che si identifica in Dio, ordinatore e legislatore di questo mondo complesso e meraviglioso.

Signori,

del colore e dei suoi problemi e funzioni si è discusso per secoli in modo vario e scientificamente interessante, nell'ambito dei circoli medici e dei collegi di arti e mestieri.

Quando la Fiera di Padova, che ho l'onore di presiedere — sempre all'avanguardia nella ricerca dei componenti principali della vita moderna e della loro impostazione operativa e mercantile — decise di ripresentare in termini attuali il tema delle applicazioni del colore, non si raffigurava di certo l'interesse che esso avrebbe suscitato non per gli iniziati o gli esperti, ma per coloro che del colore sono ad un tempo soggetto e strumento.

L'iniziativa si rivelò piuttosto ardita, ma per nulla fantasiosa o poetica o immaginaria; direi piuttosto che essa apparve fin dall'inizio concreta e riducibile a quantità d'impiego e produzione, e quindi il suo termine finale fu di stimolo alla produzione.

Avere iniziato una politica del colore nel nostro Paese e aver varato, quale mezzo di sostegno e di coordinamento, un Istituto Nazionale del Colore, fu senza dubbio un atto di lungimiranza e sono certo che Loro vorranno darmene atto.

Ora, è nei nostri programmi di procedere ad una riorganizzazione dell'Istituto, su basi tecniche di analisi e ricerca scientifica. Per fare ciò ovviamente, sarà nostra cura di creare i presupposti per una ampia forma collaborativa con Istituti di Studio a livello universitario, così da realizzare appieno il piano di sviluppo previsto statutariamente fin dalla fondazione.

Ma il nostro Istituto sarebbe ben poca cosa se gli mancassero i vantaggi delle esperienze che direttamente lor Signori hanno intrapreso in tanti settori, e gli venisse meno il contributo dei loro studi, dei quali ci impegnamo a farci zelanti interpreti.

Signori,

quel che la Fiera di Padova ha fatto negli ultimi anni per l'affermazione di alcuni settori produttivi in dinamica espansione, fino a portarli alla loro affermazione (e mi riferisco all'Imballaggio, al Freddo industriale, al Riscaldamento, ai Servizi Pubblici ed ai Trasporti Interni) lo stesso sforzo tenace farà per il raggiungimento degli altri fini dell'Istituto Nazionale del Colore nel quale convergeranno sì uomini di scienza e uomini d'industria, ma nel quale saranno chiamati, per una logica collaborazione di ordine sociale interno ed internazionale, anche rappresentanti di governo ed esponenti di quei settori di vita che con il colore abbiano diretto rapporto e dai quali il colore si attenda nuove applicazioni.

Buon lavoro, Signori. Con l'augurio di riincontrarci nella mia città fra qualche giorno, saluto in voi i pionieri di cento conquiste.



# DISCORSO INAUGURALE

## STORIA DEL COLORE

VASCO RONCHI

Direttore dell'Istituto Nazionale di Ottica - Arcetri-Firenze, Italia

La settima edizione delle « Giornate Internazionali del colore » si svolge quest'anno in Italia, e ha inizio in questa sede così prestigiosa e così ricca di colore, come il Salone dei Duecento del Palazzo Vecchio di Firenze. Dobbiamo essere grati al Sindaco La Pira, ed esprimo molto volentieri il doveroso senso di gratitudine di tutti gli intervenuti, per averci permesso di iniziare i nostri lavori in una sede di così alto valore storico.

In questa sede si discuteranno importanti e interessanti questioni tecniche e scientifiche di grande attualità, e problemi che richiederanno chi sa quanti anni ancora prima di esser portati ad una soluzione soddisfacente; ma in questa stessa sede si è anche portati a volgere uno sguardo al passato, perché appunto il suo ricco passato storico ci ricorda che un passato vi è stato, e un passato non trascurabile, ma anzi degno della massima considerazione. Perché nel passato si trovano le premesse da cui è scaturito il presente e che determineranno il futuro.

Perciò ritengo che sia molto razionale ed opportuno iniziare i lavori delle nostre « Giornate », dando uno sguardo rapido, a volo di uccello, al lungo cammino che hanno seguito le idee sulla natura del colore, prendendo le mosse addirittura dal periodo aureo della filosofia greco-romana, alcuni secoli avanti l'era volgare. Perché quello del colore è un argomento che ha interessato l'umanità fino dai tempi preistorici.

Trattandosi di una storia che riguarda oltre due millenni, non entrerò certamente in particolari molto fini; tuttavia un decorso per linee generali può esser tracciato anche nel breve tempo concesso a una relazione come quella che sto per esporre, in maniera da mettere in evidenza per quali vie dai concetti vaghi e primordiali che l'umanità si è formata circa la natura del colore, si è giunti alle idee complicate e ancora tanto discusse dei giorni nostri.

È interessante rilevare fin da principio che ancor oggi si trovano diffuse delle idee a proposito del colore, molto affini a quelle di cui si trova traccia nei documenti più antichi oggi conosciuti. Fin da quei tempi lontani accanto all'uomo della strada, convinto che il colore fosse un

qualche cosa aderente alla superficie dei corpi o nella loro struttura, un qualche cosa di obbiettivo, di identico per tutti gli osservatori, si trovava nell'ambiente della filosofia il concetto che il colore fosse invece una delle manifestazioni più riserbate della nostra mente, ciò che di più soggettivo si poteva immaginare. Fin da allora è stato rilevato che è impossibile, addirittura, descrivere come uno vede un colore e che la sola maniera che uno ha di comunicare ad altri come vede un colore è di presentare un campione, dando un nome all'aspetto di questo campione, senza avere alcuna garanzia che gli altri che lo guardano lo vedano come lo vede lui. A un interlocutore cieco dalla nascita è impossibile far comprendere che cosa vuol dire vedere rosso, giallo, verde o qualunque altro tono di colore.

Ancor oggi molte persone sono del parere dell'uomo della strada di tanti secoli or sono; ma noi dobbiamo trascurare questo parere, perché non ha retto alla critica, anche se in varie riprese si è ripresentato alla ribalta dell'ambiente scientifico, e specialmente in tempi recenti si è sviluppato in modo da presentarsi come un indirizzo molto pratico e molto utile, specialmente per le applicazioni industriali. Tuttavia, prima di giungere a idee così moderne è il caso di seguire un po' da vicino l'evoluzione delle idee dell'ambiente filosofico dell'antichità: non sarà un'indagine priva di valore e d'insegnamenti, anche per gli studi di oggi.

Una volta stabilito che il colore è un effetto psichico, una *rap-presentazione* psichica di uno stimolo esterno, dovuto a un quid che si trova sui corpi o nei corpi detti colorati, sorgeva il problema di definire nei particolari il meccanismo con cui ha luogo la conoscenza e la rappresentazione di questo quid. Siccome la via per cui l'«io» viene a conoscere i colori è quella degli occhi, il problema della visione dei colori rientra in quello più generale della visione del mondo. I filosofi dell'antichità esprimevano questo problema, come quello di «vedere le forme e i colori» dei corpi.

È stato questo un argomento che ha impegnato due millenni di profonda indagine scientifica. Rientrava nel quadro più generale dello studio del meccanismo della conoscenza, ossia del modo col quale l'«io» viene a conoscere il mondo esterno.

Era naturale che fosse chiamato in causa il complesso degli organi di senso, di cui ogni essere vivente è munito, proprio a tale scopo. Per ogni senso fu studiato accuratamente il modo col quale le caratteristiche degli oggetti erano percepite, trasmesse al cervello e quindi rappresentate nell'ambito psichico. Fu stabilito che vi dovesse essere un *contatto*, come è evidente nel caso del tatto, e del gusto; contatto un po' meno diretto, ma ancora evidente, nel caso dell'olfatto; ancora meno diretto, ma ancora sicuro nel caso dell'udito. Invece per la vista si incontrarono difficoltà gravissime; perché non si riusciva a spiegare come fosse possibile vedere al tempo stesso tante forme e tanti colori, con una varietà e una

finezza straordinaria, mentre per tutti gli altri sensi si aveva una sola sensazione alla volta.

Gli sforzi principali furono diretti alla soluzione del problema della visione in generale, considerando quello della visione dei colori come un corollario che sarebbe stato risolto facilmente, se fosse stata trovata la chiave del funzionamento del senso della vista. Però nel frattempo furono fatte delle osservazioni anche relativamente ai colori e fu notato che mentre certi colori si presentavano stabili e di aspetto concorde per tutti gli osservatori, quasi al punto da far credere che avessero ragione coloro che li consideravano aderenti alla superficie dei corpi (come il verde delle foglie, il rosso del sangue, etc) altri colori si presentavano in circostanze molto strane e lasciavano molto perplessi circa la loro origine e la loro sede. Esempi di questo tipo erano i bei colori dell'arcobaleno, già fin da quei tempi attribuito alle goccioline di pioggia sospese nell'atmosfera; ma goccioline piccolissime di acqua limpida non potevano esser sede dei colori vivacissimi dell'arcobaleno. Lo stesso doveva dirsi per la sottile pellicola di saponata bianchissima che si colora di tinte vivacissime nelle bolle di sapone. Altri esempi si ebbero nella rifrazione attraverso una superficie di acqua limpida, o un prisma di vetro, pure trasparentissimo.

Si coniarono due termini per indicare questo diverso comportamento: « permanenti » furono detti i colori aderenti ai corpi o contenuti nella loro struttura; quegli altri, che si vedevano in circostanze così strane e misteriose furono chiamati « apparenti ».

A parte questa classificazione, la storia del colore rientra per molto tempo in quella del meccanismo della visione; soltanto dopo che questo ultimo ha avuto un assestamento soddisfacente, si è potuto trattare utilmente anche il colore con un indirizzo capace di sviluppi interessanti. Con ciò si può dire che la storia del colore comincia a svilupparsi a partire dall'inizio del XVII secolo; però siccome in tutto questo studio si sono sentiti gli effetti della evoluzione delle idee circa l'argomento principale, non è fuor di luogo accennare rapidamente a una storia, molto strana e anche molto nuova, che riguarda tutta la visione in generale.

In quel meraviglioso periodo della filosofia greco-romana, in cui fiorirono le menti più eccelse e più note, del calibro di Aristotele, Platone, Euclide, il comportamento del senso della vista fu sottoposto ad un'indagine minuziosa e critica continua, nell'intento di trarne elementi per giungere a una teoria soddisfacente. Di teorie ne furono coniate più d'una, ma tutte lasciavano molto a desiderare, e offrivano il fianco a critiche demolitrici, che gli avversari certamente non lasciavano passare sotto silenzio. Senza entrare ora nei particolari di queste teorie, una conclusione ci interessa in modo particolare, per il nostro scopo: perché, osservando il comportamento del senso della vista con spirito critico e senza preconcetti teorici, o filosofici, i filosofi di quel periodo dovettero

costatare che la vista molto spesso sbaglia, nel senso che un osservatore vede tante volte delle figure in posizioni o in dimensioni in cui gli oggetti corrispondenti non esistono affatto o non vi esistono così come sono le figure. Un caso tipico, tanto semplice e che per millenni ha costituito un grande mistero è proprio quello del comunissimo specchio piano: uno vede al di là dello specchio delle figure di oggetti che non vi si trovano affatto. Se anche oggi questo fenomeno non costituisce più una stranezza per noi, dava molto da pensare a coloro che si erano posti il problema di spiegare che cosa voleva dire « vedere ». Se poi lo specchio è curvo, le figure che vi si vedono sono anche di dimensioni e di forma molto diversa da quella degli oggetti corrispondenti. Ma anche senza arrivare a tanto, cioè senza impiegare artifici ottici allora tanto misteriosi, moltissime « illusioni ottiche », come si chiamano oggi, furono scoperte anche a quei tempi. Un insieme di fenomeni in cui quello che si vede non corrisponde a quello che esiste, come ci è rivelato da altri sensi e soprattutto dal tatto.

La conclusione di queste considerazioni fu quella che doveva essere: un senso di cui non si conosce il meccanismo e che nell'esperienza ordinaria di ogni momento viene colto in fallo, sicuramente, non può meritare la fiducia di coloro che si ripromettono di conoscere la realtà obbiettiva, il mondo reale. E difatti al senso della vista fu negata la fiducia; fu posto sotto la tutela del tatto: si poteva credere a ciò che si vedeva soltanto se veniva confermato dal tatto. Il vedere una figura non era considerato probativo per affermare l'esistenza dell'oggetto corrispondente. La sentenza fu enunciata in questa forma: « *Non potest fieri scientia per visum solum* ».

Questa sentenza terribile, che praticamente ha privato l'umanità dell'uso del senso più rapido, più potente e più fino di cui dispone per conoscere il mondo esterno, e che l'ha per così dire accecata, perché ne ha ridotto le facoltà di indagine a quelle di un cieco, che esplora il mondo per mezzo del tatto, ha dominato in modo assoluto l'ambiente scientifico e filosofico mondiale per ben due millenni, con risultati che è eufemistico definire disastrosi.

Oggi la mentalità nostra è così cambiata, che non si crede neppure che per duemila anni vi sia stata una classe scientifica convinta nel modo più assoluto che non bisognava fidarsi della vista; non lo si crede addirittura possibile; ma non vi è dubbio che le cose sono andate così, e fra le innumerevoli prove che si possono portare, mi limiterò a riferirne due, di autorità indiscutibile.

L'episodio dell'Apostolo S. Tommaso, ben noto, perché è riferito anche nel Vangelo, rientra proprio in questo quadro. Egli diceva apertamente che avrebbe creduto soltanto in ciò che poteva « toccare con mano » e il Redentore risorto, quando apparve agli Apostoli, per fargli costatare la Sua effettiva presenza, lo invitò a « toccare col dito » le Sue piaghe.

Il brano del Vangelo che descrive questo episodio è stato ascoltato da innumerevoli persone e tutte più o meno hanno considerato S. Tommaso Apostolo come un tipo un po' strano e troppo scettico; invece egli credeva con piena convinzione nelle regole che gli avevano insegnato a scuola i filosofi del tempo.

Leonardo da Vinci ha affrontato problemi del genere, non con una preparazione accademica, che egli, autodidatta tipico, non ha mai avuto, ma col buon senso di un fiorentino rinascimentale. Tuttavia di fronte al fenomeno della pittura, che fa vedere su una tela, dove sono distesi degli strati di materie di vari colori, una figura, magari in profondità e del tutto diversa da quelle materie stratificate, egli, che col suo profondo acume, voleva penetrare il mistero di questo strano fenomeno, per dare alle operazioni pittoriche una base razionale e scientifica, ha affrontato il grosso problema del significato e del meccanismo della visione. Proprio nel suo trattato « Della pittura » più volte egli accenna all'insegnamento delle scuole, secondo il quale si doveva diffidare della vista. Ecco per esempio, un brano (paragrafo 32): « ... i maestri non si fidano del giudizio dell'occhio, perché sempre inganna, come prova chi vuol dividere una linea in due parti eguali a giudizio di occhio, che spesso la speranza lo inganna. Onde per tale sospetto i buoni giudici sempre temono, il che non fanno gli ignoranti... ».

E così i maestri erano sicuri di insegnare una regola preziosa agli allievi di tutte le scuole, mettendoli in guardia contro l'illusione che la vista fosse un senso degno di fiducia.

È del massimo interesse storico e filosofico la grande rivoluzione che portò alla demolizione di un errore filosofico così grande. Ciò avvenne al principio del XVII secolo; ma per comprenderne lo svolgimento, sia pure riferito con la brevità necessaria in questa occasione, bisogna ricordare un altro avvenimento poco conosciuto, e pur tanto importante.

Fra il 1280 e il 1285, degli artigiani vetrai trovarono che mettendo davanti agli occhi delle persone anziane, e come tali incapaci di vedere da vicino perché presbiteri, dei dischi di vetro trasparente a facce lucide e ricolme, come quelle delle lenticchie (e perciò furono chiamati *lenti di vetro*) esse persone potevano vedere bene da vicino come quando erano giovani.

Queste lenti di vetro furono presentate ai matematici e ne furono nettamente respinte: esse erano ordigni « fallaci », ingannevoli, attraverso i quali non si doveva guardare; ciò che vi si vedeva attraverso era costituito da figure che non corrispondevano né per dimensioni, né per posizione, a ciò che veniva dimostrato dal tatto; dunque si trattava di apparenze illusorie. Era tutto ciò l'applicazione semplice e logica della terribile sentenza sopra riferita. E per tre secoli nessuno scienziato ha preso in considerazione le lenti di vetro.

Se esse non sono scomparse dalla faccia della Terra, ed anzi si sono

diffuse e si sono perfezionate, e sono state anche graduate a seconda dell'età del cliente, e sono state anche completate con « vetri cavi » utili per i miopi, lo si deve agli artigiani ignoranti di filosofia, che non si sono preoccupati del fatto che il tatto non confermava ciò che gli osservatori vedevano attraverso le lenti.

Alla fine del XVI secolo, ancora degli artigiani mettono insieme dei cannocchiali a oculare divergente. Come si sia giunti a questo è oggi ben conosciuto e documentato, ma non è il caso ora di entrare in particolari. Il fatto importante è che anche il cannocchiale, presentato agli scienziati, fu decisamente respinto, come strumento sicuramente fallace e quindi indegno di fiducia. La sentenza, anche questa volta, fu unanime e senza discussione.

Ma ormai si avvicina il giorno del crollo della vecchia filosofia millenaria. L'artefice principale di questo crollo è stato Galileo, nel 1609 e nel 1610. Egli si ricostruisce il cannocchiale, ne intuisce la meravigliosa potenza, lo perfeziona tecnicamente, e lo impiega per osservare il cielo, contro tutte le regole fondamentali della scienza dominante. Fa delle scoperte spettacolose, che portano lo scompiglio in tutta la scienza del tempo, scienza che vantava una anzianità millenaria. La reazione dell'ambiente accademico è immediata, violenta e tremendamente ostile: il cannocchiale non è uno strumento degno di fede e quindi le presunte scoperte fatte mediante il cannocchiale sono prive di valore; non possono assolutamente esser prese in considerazione per mettere in dubbio la scienza dei maestri. Ma Galileo non cede; dopo una polemica grandiosa, ciclopica addirittura, riesce ad avere ragione sugli avversari e la scienza antica scompare dalla circolazione. Gli uomini di scienza di età avanzata non hanno ceduto neppure loro, ma hanno portato seco nella tomba le convinzioni che si erano formate nella scuola dei padri; i giovani hanno abbracciato senz'altro la nuova fede nella visione, hanno dimenticato la vecchia terribile sentenza dello scetticismo contro di essa, e hanno iniziato una nuova era, in cui si ha piena fede in ciò che si vede direttamente, senza chiedere la conferma al tatto, e si ha piena fede in ciò che si vede mediante gli strumenti ottici. Forse anche troppo.

L'opera filosofica di Galileo è stata utilmente fiancheggiata da quella tecnica del Keplero, che nel 1604 dette al mondo la chiave del meccanismo della visione, come si ritiene giusta anche oggi. Con ciò la vista non era più un senso di cui si doveva diffidare perché sbagliava spesso e perché non si sapeva come funzionasse; ora, conoscendone il meccanismo, le illusioni ottiche sono state declassate: invece di rappresentare l'argomento fondamentale dello studio della visione, sono passate ad essere un modestissimo capitolo, che il più delle volte è addirittura passato sotto silenzio.

La nuova era si può dire che è cominciata il 24 Agosto 1609, data di una lettera scritta da Galileo alla Signoria di Venezia: in essa Galileo

dichiara che il cannocchiale « era uno strumento di giovamento inestimabile ». Era quella la prima volta che un uomo di scienza aveva il coraggio di fare una dichiarazione del genere.

Con ciò le lenti entrarono nella scienza come ordigni di grande attualità e si cominciò a farne la teoria e a studiarne le caratteristiche e il perfezionamento. L'ottica nuova si avviava a un periodo di grande splendore.

Fu in questo periodo che si cominciò a parlare di raggi rettilinei, lungo i quali si propagava un quid capace di impressionare l'occhio umano. Sorse allora il problema di definire che cosa era questo quid. Nel latino dell'epoca, si chiamò « lumen », per distinguerlo dall'effetto psichico, prodotto dallo stimolo stesso, effetto che fu chiamato « lux ». Sorse così il problema della ricerca della natura del « lumen », problema che poi fu chiamato della « natura della luce ». Naturalmente legato a questo, vi fu anche quello della natura del colore. Veniamo così alla storia che ora c'interessa.

Fino al principio del XVII secolo era opinione generale che il lumen fosse « puro e bianco » e che si inquinasse di colore riflettendosi alla superficie di certi corpi, o attraversandone altri.

Il primo a lanciare idee nuove in proposito è stato Cartesio: partendo dall'ipotesi (già lanciata da diverso tempo, per quanto Isacco Newton non fosse ancora nato) che il lumen fosse costituito da particelle materiali di forma sferica, il Cartesio suppose che esse, oltre ad esser dotate di un modo di traslazione velocissimo, fossero anche dotate di un moto di rotazione attorno a un asse passante per il loro centro; quello che oggi si chiama uno « spin ». Le particelle dotate di diverso moto di rotazione facevano vedere colori diversi, quando stimolavano la retina. Però il Cartesio non insisté a lungo su questa idea, e pur vantandosi di saper spiegare con essa la visione di tutti i colori, non entrò in particolari e fu presto dimenticato.

Seguì a poca distanza l'opera fondamentale del P. Francesco Maria Grimaldi, dal titolo « Physico-Mathesis de lumine, coloribus et iride » pubblicata nel 1665, due anni dopo la morte dell'Autore. Il quale insiste con una lunga e minuziosa dimostrazione sul concetto che il colore non è un qualche cosa distinto dal lumen, ma ne costituisce una « modificazione ». Nella parte della sua opera, in cui egli difende la struttura corpuscolare del lumen, pur non accettando l'idea dello spin del Cartesio, lancia un'idea affine: secondo lui, la traiettoria di ogni corpuscolo non sarebbe diritta, ma sinuosa, e dalla frequenza delle sinuosità doveva dipendere il colore che un osservatore avrebbe visto, quando la sua retina fosse stata stimolata da un certo corpuscolo. L'idea non poteva reggere, perché, da quando si affermò il principio d'inerzia, una traiettoria sinuosa diventava un assurdo meccanico; ma è ben noto che l'idea stessa fu ripresa sotto altra forma, un secolo e mezzo più tardi, quando si affermò la teoria ondulatoria del lumen.

A questo punto interviene Isacco Newton: con delle esperienze famose e brillanti eseguite mediante i prismi, egli giunge a formulare la teoria che i colori non fossero una modificazione del lumen, ma fossero già contenuti nel lumen; cioè i corpuscoli costituenti il lumen sono di massa diversa, e il loro effetto sull'occhio dipende precisamente dalla massa. Egli arriva a realizzare il lumen monocromatico, cioè composto tutto di particelle identiche, e dimostra che i colori dello spettro corrispondono proprio a impressioni prodotte sull'occhio da fasci di corpuscoli omogenei, costituiti da particelle di massa minore per il rosso e di massa via via maggiore per i colori arancio, giallo, verde, azzurro, indaco e la maggiore massa corrispondente dunque al violetto. Egli arrivò a una concezione del genere, collegando il comportamento di un fascio di lumen nella rifrazione, col colore che faceva vedere stimolando un occhio.

Però anche il Newton insisté decisamente sul concetto che il colore era soltanto l'effetto psichico interno all'osservatore, e non era fuori della sua mente; fuori di questa vi erano soltanto delle particelle di massa diversa. Tanto è vero che egli addirittura voleva chiamare *rubrifici* e non *rossi* i corpuscoli e i fasci detti luminosi. Però quando egli cercò di spiegare la natura dei colori « apparenti » di un tempo (e ciò era indispensabile per dar valore alla sua teoria), andò incontro a un completo fallimento.

I colori « permanenti » furono dal Newton riportati giustamente a una riflessione selettiva delle varie particelle di massa diversa, o a una trasmissione pure selettiva delle particelle stesse, nei corpi trasparenti, detti colorati; ma i colori « apparenti » come quelli delle lamine sottili, cioè delle bolle di sapone e affini, risultarono ribelli alla teoria corpuscolare. Il Newton non si pronunciò decisamente né in senso favorevole, né in senso negativo e così le sue idee si affermarono in tutto l'ambiente culturale, che si fermò ai fenomeni più elementari e più appariscenti e si disinteressò di tutte le contrarietà difficilmente reperibili.

Ma nel frattempo la fisica aveva subito un mutamento filosofico profondo. Per reazione al peripateticismo dei secoli passati, che dava molto peso ai fenomeni psichici e razionali e diffidava profondamente di tutto ciò che aveva un carattere sensoriale, rinunciando a priori alla conoscenza del mondo esterno, prevalse ora una corrente positivista, che tendeva a mettere in primo piano tutto ciò che aveva un carattere fisico, obbiettivo indipendente dall'osservatore, dando sempre meno importanza all'intervento psichico, fino a dimenticarsene del tutto.

Si andò così verso un periodo in cui tutto doveva esser fisico a tutti i costi, anche a costo di chiudere gli occhi di fronte alle dimostrazioni più evidenti del contrario. Nella scienza ha sempre avuto un'ingerenza fondamentale l'indirizzo filosofico, e anche il dogmatismo; a quello aristotelico di buona memoria, ora ne subentrava un altro, che non aveva



un nome di filosofo, ma che era ancor più assoluto e imperante di quello precedente: era appunto quello della scuola materialista.

Le conseguenze di questo nuovo dogmatismo si sentono tuttora ed è molto difficile isolarle e eliminarle, perché la scuola tutta ne è stata impregnata in questi ultimi secoli e la mentalità di tutto l'ambiente colto è stata formata in conformità.

Una delle manifestazioni più notevoli è stata la traduzione nelle lingue volgari delle due parole « lumen » e « lux ». Ovunque è stata adottata una parola sola, come « luce » in italiano, « luz » in spagnolo, « Licht » in tedesco, « light » in inglese; in francese si ha « lumière », che è notevole, perché mentre tutte le altre sono etimologicamente legate alla « lux », questa è la sola legata al « lumen ». Ciò ha voluto dire che ovunque si è concentrata l'attenzione sull'agente esterno capace di stimolare l'occhio e si è assolutamente dimenticato l'effetto interno, tanto è vero che oggi la gran massa del pubblico, che ha studiato, è convinta che « la luce che si vede » sia un fenomeno fisico, indipendente dall'osservatore, nel senso che se uno chiude gli occhi, l'ambiente circostante rimane chiaro e luminoso come si vedeva a occhi aperti.

Non è il caso ora di entrare nei particolari di una dimostrazione capace di convincere tutti che questa idea si deve ritenere sostanzialmente errata; ma ho dovuto fare accenno a questa influenza filosofica che ha dominato i secoli XVIII e XIX specialmente, perché naturalmente anche le idee circa la natura del colore ne hanno fortemente risentito. L'idea, che una volta era del tutto estranea all'ambiente filosofico e scientifico, e che invece dominava l'uomo della strada e cioè che il colore fosse un qualche cosa di obbiettivo esterno all'osservatore, ed esistente anche senza l'osservatore, prendeva il sopravvento anche nell'ambiente scientifico dei secoli suddetti. E come da una parte l'illusione che la luce fosse un fenomeno obbiettivo, misurabile come mezzi e con metodi fisici portava alla nascita della fotometria, così l'illusione che altrettanto si potesse pensare per i colori ha portato alla nascita della colorimetria.

A questo decorso filosofico contribuì anche favorevolmente l'evoluzione storica degli studi circa la « natura della luce ». È ben noto che nella prima decade del secolo XIX la teoria corpuscolare crollò, rapidamente, nonostante la difesa appassionata che ne fece l'ambiente accademico. Si verificò un altro movimento violento sul tipo di quello che ebbe per protagonisti Galileo e il Keplero due secoli prima. Questa volta i protagonisti furono due giovani estranei all'ambiente ufficiale: Thomas Young, medico e Augustin Fresnel, ingegnere civile. Le loro ricerche in brevissimo tempo portarono all'affermazione incontestata della teoria ondulatoria della « luce ». Ormai nessuno più dubitava, di fronte alle esperienze, veramente ammirevoli, con cui si dava ragione di fenomeni fino ad allora incomprensibili, come quelli dell'interferenza, della diffrazione e della polarizzazione, che la « luce » era composta di onde; e di conseguenza che

i colori corrispondevano a diverse lunghezze d'onda, proprio come aveva pensato un secolo e mezzo prima P. Grimaldi.

La situazione ora, dal punto di vista filosofico, era divenuta ben più difficile, nel senso che, prima, durante il dominio della teoria corpuscolare, i corpuscoli non li aveva mai visti nessuno e quindi il concetto che il colore fosse quello dei corpuscoli di una data massa era un'idea puramente ipotetica, priva di qualunque base sperimentale. D'altra parte un supporto materiale poteva essere anche colorato, e quindi non vi era nulla di assurdo a pensare, nonostante il parere contrario proprio del Newton, che vi fosse una « luce colorata » fatta di minutissimi corpuscoli colorati in sé.

Ma ora che si affermava la teoria ondulatoria, la misura della lunghezza d'onda si faceva con grande facilità, e l'operatore al tempo stesso che faceva una determinazione di lunghezza d'onda d'un fascio monocromatico, trovava ad esempio 0,6 micron e vedeva giallo; e tutte le volte che vedeva giallo, trovava lo stesso valore della lunghezza d'onda. Quindi era troppo facile esser portati a pensare che « la luce » di 0,6 micron di lunghezza d'onda fosse gialla. Con ciò si perse l'abitudine a pensare e a dire che tali onde facevano vedere giallo e si prese la consuetudine di parlare dei colori, come legati alla lunghezza d'onda, in sé stessi, senza che fosse necessario l'intervento di un osservatore. Senza mai rilevare che razza di discorso assurdo ne veniva fuori.

Perché se anche in un primo tempo le onde erano pensate di natura elastica, poi fu dimostrato che erano di natura elettromagnetica; e ciò doveva far riflettere che delle onde costituite da variazioni di forza elettrica e magnetica non possono aver un aspetto e quindi neppure una luminosità e quindi neppure un colore, e che parlare di onde rosse, verdi e violette è il discorso più assurdo che si possa fare a meno che non si metta bene in chiaro che è un discorso puramente convenzionale, cioè frasi contratte, per indicare onde che agendo sull'occhio di un osservatore fanno vedere colore rosso, verde o violetto.

Ma se le cose fossero state espone chiaramente in questa forma, a nessuno sarebbe venuto in mente di misurare i colori, dato che essi sono soltanto nella mente degli osservatori. Invece le frasi contratte non sono state spiegate bene; non è stato detto nulla circa la convenzione che era dietro di esse, e ciò ha portato molte persone a prenderle in senso stretto, e a dedicarsi alla misura del colore, cioè a correre dietro al miraggio di misurare con mezzi e con metodi fisici un fenomeno squisitamente psichico e inoggettivabile; perché almeno finora nessuno è riuscito a oggettivarlo.

Questo succedersi di idee sta a dimostrare quale confusione regnava durante il secolo scorso nel campo del colore; confusione che ancor oggi non è del tutto dissipata.

Perché nel frattempo è intervenuta la specializzazione a complicare le cose. È evidente che al colore sono interessate molte classi di

persone; nel campo scientifico vi sono interessati, come si è visto, dei fisici; ma vi intervengono anche i fisiologi, e infine vi debbono intervenire anche gli psicologi. Ma vi è tutto un altro gruppo di persone interessate al colore, come gli artisti, i tecnici fabbricanti di materie coloranti, quelli della illuminazione ed altri ancora.

Ora mentre i fisici ritenevano di aver chiuso il problema, una volta collegati i colori alla lunghezza d'onda della « luce », i fisiologi andavano per conto loro a cercare di definire l'intervento della retina, ed alcuni hanno addirittura avanzato l'idea che i colori nascano nella retina; e infine gli psicologi, sia pure molto limitatamente, hanno anche cercato di definire come l'intervento psichico può modificare la visione dei colori, una volta definito l'agente esterno e lo stimolo retineo. E siccome questi tre gruppi di specialisti hanno preparazione e mentalità del tutto diverse, gli studi si svolgono come in compartimenti stagni senza uno scambio di vedute come sarebbe necessario e auspicabile.

Il fatto è che già nel campo artistico si era affermato il concetto della tricromia, che evidentemente non andava affatto d'accordo con la idea dei fisici che colore e lunghezza d'onda della radiazione fossero strettamente collegati; infatti uno stesso colore si può vedere inviando su un occhio sia un fascio di radiazione monocromatica, con una lunghezza di onda ben definita, sia una miscela di due o tre fasci di radiazioni di lunghezza d'onda del tutto diversa e in dosi opportune. E ciò in infinite combinazioni diverse.

Gli studi sul comportamento dell'organo della vista di fronte agli stimoli radianti si sono moltiplicati, e oggi la letteratura in proposito è di una vastità impressionante. Con tutto ciò chi volesse dare una definizione del colore, in base ai risultati delle ricerche più recenti, sarebbe portato a considerare il colore come « *la rappresentazione psichica di una caratteristica della radiazione ottica, caratteristica a cui ancora non si sa dare un nome* ».

Sorge allora spontanea la domanda: ma la colorimetria, che pure è tuttora in pieno svolgimento, ed è trattata da eminenti specialisti in tutto il mondo, che cosa misura? Non misura il colore? La risposta non è semplice. Se uno domandasse se la colorimetria misura i colori che un osservatore vede, si deve rispondere senz'altro di no. La colorimetria misura delle condizioni fisiche, che corrispondono a dei *colori convenzionali*. Oggi non si ha più la pretesa di misurare i colori che si vedono. Vi si è decisamente rinunciato. Ma per usi pratici, specialmente di carattere industriale, si è ritenuto utile definire delle condizioni in cui si dovrebbe vedere sempre lo stesso colore.

Così, se si deve definire in un contratto il colore di una stoffa, non basta indicare il suo tono di colore con un nome; ciò sarebbe troppo vago e darebbe luogo a innumerevoli contestazioni. D'altra parte, come già aveva detto chiaramente il Newton, la superficie della stoffa ha un colore

in quanto ha una riflettanza selettiva. Questa oggi si può determinare facilmente mediante degli apparati spettrofotometrici, e si può rappresentare mediante un grafico, in funzione della lunghezza d'onda. Però una volta definita la riflettanza, il colore varia a seconda della composizione spettrale della radiazione illuminante; e anche a seconda della sensibilità cromatica dell'occhio che riceva la radiazione riflessa dalla stoffa. Non solo, ma stoffe che danno dei diagrammi di riflettanza selettiva molto diversi, possono apparire con lo stesso colore, anche se illuminate con la stessa radiazione, e osservate dallo stesso occhio. Un insieme di circostanze veramente sconcertante.

Con una pazienza e una tenacia veramente ammirevoli, i colorimetristi hanno fissato con convenzione internazionale la sorgente di radiazione illuminante (veramente ne hanno fissate tre o quattro) e hanno fissato anche la curva di visibilità dell'occhio osservatore, ossia il suo diagramma di sensibilità cromatica in funzione della lunghezza d'onda. Con una manipolazione numerica, che tien conto del diagramma della riflettanza selettiva della superficie colorata in studio, della composizione spettrale della sorgente considerata e della sensibilità cromatica dell'occhio « normale », si arriva a definire tre *coordinate tricromatiche*, ossia tre numeri, la cui somma è uguale all'unità e che, secondo una opportuna convenzione definiscono il colore che presenterebbe quella superficie studiata, se fosse illuminata con l'illuminante prescelto e fosse guardata dall'occhio normale.

Come si vede, il colore vero, quello visto da un osservatore reale, è completamente sparito. Si tratta di convenzioni molto utili, che sono assai usate, in mancanza di meglio.

Anche perché prescindono completamente da ogni intervento psichico dell'osservatore. Il quale è tutt'altro che trascurabile. Basti citare un caso carino: un gatto bianco di notte manda nell'occhio di un osservatore meno radiazioni di un gatto nero illuminato dal sole; secondo i colorimetristi, quest'ultimo si dovrebbe veder bianco e nero il primo; ma la psiche dell'osservatore non è dello stesso parere.

Come si vede, da questo rapido viaggio nella storia del colore, il campo è oggi straordinariamente complesso e ben lungi dall'essere arato del tutto. Ciò giustifica ampiamente l'iniziativa del Centre d'Information de la Couleur di Parigi, che ogni anno chiama a raccolta i cultori del colore, per ascoltarne le relazioni, per trar profitto dei nuovi risultati dei loro studi e per incitarli a continuare questa lotta plurimillennaria per vincere il mistero affascinante del colore. L'Associazione Ottica Italiana di Firenze, e l'Istituto Nazionale del Colore di Padova si associano entusiasticamente al Centre parigino, per collaborare al raggiungimento di questo scopo.

Termino augurando ai Convenuti intenso e proficuo lavoro.

**SECTION I**  
**COLORIMETRIE**

*Présidents:*

Professeur VASCO RONCHI (Italie)  
Professeur YVES LE GRAND (France)

*Rapporteurs:*

M. EDELMANN (AFC - France)  
M. CAHIERRE (Institut Géographique National - France)  
M. CRUSET (Institut Géographique National - France)



# COMITE « BASES THEORIQUES DE LA COLORIMETRIE »

PAUL KOWALISKI

Kodak-Pathé - Vincennes, France

Il est connu que l'application pratique des méthodes colorimétriques n'est pas toujours aisée. Des travaux effectués par divers membres de l'Association Française de Colorimétrie, au courant des années 1960-1961, ont confirmé ce point. C'est ainsi que M. Le Grand, Président de l'Association, a proposé, lors de la réunion du 13 novembre 1961 du Comité de Direction Scientifique, de fonder, parmi les autres comités de travail de l'Association, celui des Bases Théoriques de la Colorimétrie.

## I - But du comité et historique.

Dès la première réunion du comité, il est clairement apparu qu'il ne s'agissait pas tant d'étudier les aspects purement théoriques que de chercher le moyen d'effectuer *une synthèse entre les systèmes de coordonnées — comme celui de la C.I.E. — et les systèmes de repérage par échantillons.* Ces derniers sont en effet très répandus dans les industries employant surtout des couleurs de surface, comme le textile, les peintures et les encres d'imprimerie. Un nouveau système de repérage par échantillons ayant, par ailleurs, été mis au point avec un soin particulier en Allemagne, et normalisé par l'Association Allemande de Normalisation, l'étude de son utilisation en France, dans le cadre d'une normalisation éventuelle, s'est imposée.

Pour pouvoir effectuer une synthèse utile, on a donc décidé d'étudier les possibilités d'un système de coordonnées général, fournissant les chromaticités des diagrammes habituels, mais aussi des échelles convenablement choisies pour la représentation des luminosités visuelles.

C'est ainsi que les travaux du Comité ont été délimités dans un cadre bien défini, condition nécessaire à l'aboutissement rapide des travaux. Sur la proposition de M. Le Grand, le comité s'est assuré, dès son départ, la collaboration de membres actifs dans les diverses industries intéressées, ainsi que de plusieurs personnes ayant déjà travaillé sur des sujets simi-

lares sous un aspect plus théorique, comme M. Blottiau, qui avait proposé un système photo-colorimétrique dès 1941, MM. Bertrand et Parra, membres actifs de l'Association, et M. Leleu, qui avait effectué précédemment un important travail bibliographique. L'industrie des peintures est représentée, dans le Comité, par Mme Jonckheere, l'imprimerie et l'industrie du livre par M. Driancourt, les fabricants de lampes et de dispositifs d'éclairage par MM. Pagès et Barthès, l'Institut du Textile par M. Jacquemart, et l'industrie photographique par nous-mêmes.

## II - Problèmes étudiés par le comité.

La préoccupation principale du Comité des Bases Théoriques de la Colorimétrie a été, nous l'avons vu, *de réunir, dans une représentation graphique, non seulement les teintes et les saturations, mais également les luminosités*. Cette réintroduction de la photométrie dans un système colorimétrique a, en particulier, été envisagée pour permettre aussi bien la représentation de lumières colorées, que des couleurs d'échantillons vus par réflexion. Une telle représentation devrait permettre d'effectuer la synthèse envisagée entre les systèmes de repérage par échantillons et les systèmes classiques de coordonnées. Pour atteindre ce but, le Comité a dirigé ses efforts dans deux directions: d'abord une *étude bibliographique* approfondie a été effectuée par plusieurs de ses membres pour mieux préciser les problèmes et pour rendre les résultats consignés dans diverses publications plus facilement accessibles à tous les autres membres.

Le fait de vouloir incorporer de façon organique, dans le système étudié, au moins un des systèmes de repérage par échantillons a conduit le Comité à envisager, dès le départ, *une représentation à espacement uniforme*. L'étude bibliographique a donc, avant tout, porté sur la connaissance des divers systèmes de coordonnées de ce type, puis sur celle des systèmes d'échantillons, et ensuite sur *la luminosité apparente des couleurs en fonction de leur luminosité colorimétrique*, c'est-à-dire sur le rapport  $\frac{L}{Y}$ . Envisageant, par ailleurs, de raccorder le système étudié au diagramme C.I.E. par une transformation linéaire, on a aussi fait le point de *l'aspect théorique des transformations projectives des diagrammes de mélange des couleurs*.

Par ailleurs, *un travail expérimental* a été entrepris pour déterminer les luminosités à divers niveaux de saturation et d'éclairement pour une série de teintes bien déterminées.



### III - Travaux entrepris par le comité et résultats obtenus.

#### A - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.

##### 1° Diagrammes plans de chromaticité à espacement uniforme.

Dans une représentation plane des chromaticités à espacements uniformes, des différences juste perceptibles entre deux couleurs doivent être représentées dans l'ensemble de l'espace du diagramme, c'est-à-dire pour toutes les chromaticités, par des segments de longueur égale. Le diagramme C.I.E. répond mal à cette condition: Wright (1) a montré, en effet, que le rapport de segments représentant des différences juste perceptibles peut y atteindre la valeur 20/1. Ainsi, de nombreuses transformations projectives ou autres du diagramme C.I.E. ont été proposées par divers auteurs dans le but d'obtenir une représentation à espacements approximativement uniformes. Le tableau I donne les équations de transformation de divers systèmes, dont l'uniformité d'espacement a été étudiée par Burnham (2) par rapport au système Munsell choisi comme référence. Dans la plupart de ces systèmes, les couleurs d'égales saturations ne sont pas réparties sur des cercles concentriques, mais sur des courbes ovales et excentrées par rapport au gris neutre. Burnham conclut toutefois que les meilleures approximations de l'espace Munsell ne fournissent pas nécessairement un espacement visuellement correct des couleurs.

Tableau I

Equations de transformation de divers diagrammes de chromaticité, par rapport au système XYZ de la C.I.E. (1931):

##### a) Système Judd USC (1935)

$$(x, y) \rightarrow (r, g) \begin{cases} r = (2,7760x + 2,1543y - 0,1192)/(-x + 6,3553y + 1,5405) \\ g = (-2,9446x + 5,0323y + 0,8283)/(-x + 6,3553y + 1,5405) \end{cases}$$

##### b) Système MacAdam (1937)

$$(x, y) \rightarrow (u, v) \begin{cases} u = 2x/(6y - x + 1,5) \\ v = 3y/(6y - x + 1,5) \end{cases}$$

c) Système Breckenridge-Schaub (1939)

$$(x, y) \rightarrow (x', y') \left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{(0,82303x + 0,82303y - 0,82303)}{(x - 7,02336y - 1,64023)} \\ y' = \frac{(3,697x - 5,07713y - 1,36896)}{(x - 7,05336y - 1,64023)} \end{array} \right.$$

$$(x', y') \rightarrow (x'', y'') \left\{ \begin{array}{l} x'' = 0,075 - x' \\ y'' = y' - 0,5 \end{array} \right.$$

d) Système de Scofield-Judd-Hunter (1941)

$$(x, y) \rightarrow (\alpha, \beta) \left\{ \begin{array}{l} \alpha = \frac{(2,4266x - 1,3631y - 0,3214)}{(x + 2,2633y + 1,1054)} \\ \beta = \frac{(0,571x + 1,2447y - 0,5708)}{(x + 2,2633y + 1,1054)} \end{array} \right.$$

e) Système Adams (1942)

(Transformations valables pour la source étalon C)

$$(X/0,9804, Y, Z/1,1810) \rightarrow (V_X, V_Y, V_Z)$$

où  $V$  est la « Valeur » dans le système de Munsell,

$$(T, S) \rightarrow [(V_X - V_Y), (V_Z - V_Y)]$$

f) Système Moon-Spencer (1943)

$$(X, Z) \rightarrow (U, V) \left\{ \begin{array}{l} U = 0,974X - 0,226Z \\ V = 0,226X + 0,974Z \end{array} \right.$$

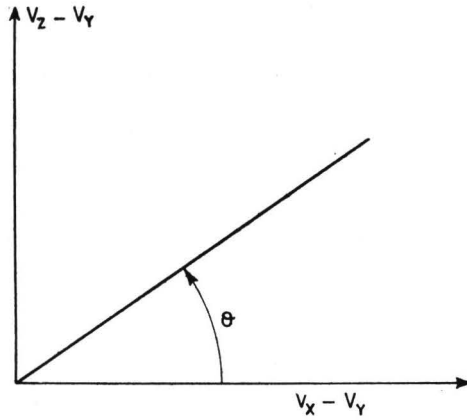
$$(U, V) \rightarrow (\xi^1, \xi^3) \left\{ \begin{array}{l} \xi^1 = 250/\text{tg} \left[ 0,668 \left( \frac{U}{100} - 1 \right) \right] \\ \xi^3 = 150,8/\text{tg} \left[ 0,331 \left( \frac{V}{100} \right) \right] \end{array} \right.$$

g) Système Farnsworth (1944)

$$(x, y) \rightarrow (x', y') \left\{ \begin{array}{l} x' = 0,66x/(0,2665 + y) \\ y' = (0,2666 + 1)/(0,2666 + y) \end{array} \right.$$

h) Système Saunderson-Milner (1946)

$$[(V_X - V_Y), (V_Z - V_Y)] \rightarrow (\zeta_1, \zeta_3) \left\{ \begin{array}{l} \zeta_1 = (V_X - V_Y) (9,37 + 0,79 \cos \theta) \\ \zeta_3 = (V_Z - V_Y) (3,33 + 0,87 \sin \theta) \end{array} \right.$$



i) Système Hunter (1948)

$$(X, Y, Z) \rightarrow (a, b, R_d) \left\{ \begin{array}{l} a = 175f_V(1,02X - Y) \\ b = 70f_V(Y - 0,847Z), \text{ où } f_V = \frac{0,51(21 + 20Y)}{(1 + 20Y)} \\ R_d = 100Y \end{array} \right.$$

En ce qui concerne les diagrammes obtenus par transformations projectives, des équations de transformation établies par MacAdam (3) permettent leur étude. On a ainsi comparé les diagrammes proposées par Judd (1935) (4), MacAdam (1937) (3), Breckenridge & Schaub (1939) (5), et Judd (1944). Le tableau II montre les espacements obtenus pour différentes couleurs, dans deux de ces diagrammes, par rapport au diagramme C.I.E.

Tableau II

|         | C.I.E. | Breck. & Schaub | MacAdam |
|---------|--------|-----------------|---------|
| Vert    | 20     | 2,4             | 2,8     |
| Jaune   | 12,7   | 1,6             | 2,2     |
| Orange  | 10     | 2,4             | 3,1     |
| Rouge   | 3,6    | 2,4             | 3,1     |
| Pourpre | 10,9   | 3,2             | 3,7     |
| Violet  | 1      | 1               | 1       |
| Bleu    | 3,6    | 1,2             | 1,4     |

Bien que le rapport extrême des espacements soit plus faible pour le diagramme de Breckenridge & Schaub, la répartition est plus uniforme dans

celui proposé par MacAdam qui a, en outre, l'avantage d'avoir des équations de transformation très simples. Son emploi ayant, par ailleurs, été recommandé par le C.I.E. dans sa session de 1959 (6) pour un usage général dans tous les cas où l'espacement uniforme est important, le comité a décidé de le retenir comme diagramme de base dans le plan de référence du système étudié.

## 2° Transformation projective de diagrammes de chromaticité.

Parallèlement à l'étude des diagrammes de chromaticité à espacements uniformes, l'étude bibliographique a également porté sur le caractère intrinsèque des transformations projectives de ces diagrammes. On a, en particulier, étudié les travaux de Wyszecki (7), Bingley (8) et MacAdam (9).

La première de ces publications donne une classification des transformations projectives par rapport à leurs éléments fixes, c'est-à-dire des points et des droites qui sont invariants par rapport à une transformation projective. Cette classification et l'application de quelques théorèmes connus de la géométrie projective ont permis à l'auteur de développer une méthode graphique pour la construction des coordonnées de chromaticité  $x'$  et  $y'$ , correspondant, lors de l'application d'une matrice de transformation, à un jeu initial de coordonnées  $x$  et  $y$ . Quelques exemples et la discussion des points fixes montrent que ceux-ci, bien que n'ayant pas une signification intrinsèque pour des échelles uniformes de chromaticité, semblent permettre la définition d'une condition nécessaire à l'espacement uniforme des couleurs dans un diagramme de chromaticité.

Bingley indique une méthode géométrique pour la construction de tous les points d'un diagramme de chromaticité résultat d'une transformation d'un autre diagramme lorsque 4 points correspondants sont connus.

L'étude de MacAdam, enfin, s'applique particulièrement au cas des diagrammes à espacements uniformes. Il démontre en particulier que les points représentatifs de couleurs de différences juste discernables, donc de différences identiques par définition, ne peuvent devenir équidistants par une transformation projective du diagramme classique de chromaticité, que si leurs distances relatives le long d'une droite quelconque sont proportionnelles au carré de leur distance d'un point fixe sur cette droite, et si le lieu de tous ces points fixes est une droite.

On sait que toutes les couleurs qui diffèrent d'une couleur donnée par une quantité juste perceptible se situent dans le diagramme C.I.E. sur une ellipse. Pour que toutes ces ellipses soient transformées par une seule transformation projective en cercles de même rayon, il faut que les tangentes de chaque paire d'ellipses aient leur intersection sur une même droite, qui est d'ailleurs la même que le lieu des points particuliers juste décrits. Remarquons que ces conditions sont observées avec une certaine approximation pour la transformation  $u, v$  de MacAdam.

### 3° *Systèmes de classification par échantillons.*

Il existe un grand nombre de systèmes de classification des couleurs matérielles. Les plus anciens ont été proposés par des peintres ou utilisateurs de matières colorantes. Les arrangements spatiaux des classifications par échantillons peuvent tous s'inscrire dans le solide défini par Luther (10) et Nyberg (11). Toutes les lumières colorées étant représentées par des vecteurs dans l'espace conique ayant pour sommet le point alychne, et comme directrice la ligne des couleurs spectrales disposée dans un plan convenablement choisi, la surface du solide de Luther et Nyberg est tangente au cône des vecteurs spectraux à proximité du point alychne dépourvu de luminosité, et converge ensuite vers un deuxième sommet représentant la teinte du pigment blanc le plus lumineux. Les couleurs maximales s'inscrivent sur la courbe passant par les points de cette surface, les plus éloignés de l'axe reliant le point alychne et le point représentatif du blanc.

Un groupement des systèmes les plus importants suivant leurs caractéristiques principales a récemment été proposé par Wyszecski (12). Il rassemble les systèmes de repérage en trois groupes:

- le premier a comme base le mélange additif obtenu à l'aide du disque de Plateau. On établit des échelles de couleurs suivant les réglages effectués sur le disque des couleurs primaires, et on les imite par peinture à l'aide d'un mélange approprié de pigments (représentant typique: la classification Ostwald);
- le deuxième groupe établit des échelles de couleurs étalons par mélanges soustractifs, en agissant systématiquement sur les quantités des pigments introduits dans les mélanges;
- le troisième groupe, enfin, comporte des couleurs échelonnées suivant leur équidistance visuelle. Ces systèmes ont en général pour paramètres la teinte, la saturation et la luminosité, portés en échelles dont le choix leur est caractéristique. Les systèmes à équidistance visuelle ont une grande importance pratique. Une classification de couleurs matérielles dont les échelles résultent de variations systématiques des quantités de colorants ou pigments de base, ne fournit pas, en général, des échelles visuellement équidistantes. Elle comporte, dans certaines régions, trop d'échantillons, et dans d'autres un nombre insuffisant. Or, une interpolation efficace n'est possible qu'avec des échelles d'équidistance satisfaisante entre les échantillons. Les systèmes conçus a priori dans le but d'une équidistance visuelle se distinguent donc des autres par le mode opératoire employé au cours de leur établissement. Ainsi, les échantillons des deux systèmes principaux, ceux de la classification Munsell (13), et ceux du système DIN (14), ont été choisis à l'aide de méthodes statistiques pour fournir des échelles de teintes paraissant visuellement équidistantes à un grand nombre d'observateurs.

4° *La luminosité apparente des couleurs en fonction de leur luminosité colorimétrique* (rapport  $\frac{L}{Y}$ ).

Des études récentes ont montré que des couleurs d'égale luminosité possèdent des luminances qui, calculées à partir de l'observateur de référence de la C.I.E. (1931), varient systématiquement avec la chromaticité, les couleurs saturées exigeant moins de luminance que les désaturées pour un aspect lumineux équivalent, sauf dans la région du jaune. On a donc étudié les travaux de Wyszecki et Sanders (15), ceux de Chapanis et Halsey (16), et enfin l'étude de Halsey (17) comparant trois méthodes de gradation des couleurs.

Ce dernier travail a paru particulièrement intéressant, le domaine de la sensation colorée se prêtant plus difficilement que tout autre à une gradation. Les trois méthodes étudiées par Halsey sont:

- par comparaison de couleurs voisines, on définit l'unité classique de discrimination sensorielle. Le domaine exploré est partagé en intervalles physiques arbitraires correspondant à des mélanges déterminés s'échelonnant du bleu affecté du coefficient 95%, au jaune affecté de 5%. Pour chaque couleur obtenue, on cherche le mélange juste discernable, et cette différence liminaire variable avec chaque point de la droite fournit, par sommation étendue à l'intervalle entier, l'ensemble des échelons perceptifs;
- on effectue des bipartitions successives d'intervalles plus larges en essayant de placer entre les couples de couleurs extrêmes un mélange qui, psychologiquement, se place à égale distance. A la limite de l'opération, on note le nombre d'échelons obtenus;
- la méthode la plus prometteuse semble être la suivante: on présente à l'observateur une série de mélanges situés sur la droite signalée précédemment. Par un exercice très soigneux, on l'entraîne à associer à chaque couleur un nombre approprié. Puis on lui présente chacune des couleurs précédentes isolément, suivant un processus étudié. Un relevé statistique permet alors de replacer chacune des couleurs en un point qui est en rapport avec la fréquence des réponses. L'ensemble obtenu partage l'intervalle total en échelons perceptifs.

Si, d'une manière générale, les trois échelles obtenues sont en assez bon accord entre elles, les égalisations en luminance ne fournissent jamais des chiffres en bon accord avec les prévisions de la C.I.E.

Les autres publications étudiées concernent donc particulièrement le rapport entre la luminance et l'aspect lumineux équivalent. Ainsi, les recherches de Sanders et Wyszecki avaient pour objet d'établir une échelle de luminosités fonction des composantes trichromatiques de la C.I.E. En accord avec la définition de la luminosité (correspondant psychosensoriel du facteur de luminance), ces auteurs comparent deux échantillons, l'un

coloré et l'autre neutre; à l'égalisation en luminosité, ils mesurent, au moyen d'un spectrophotomètre, d'une part  $Y$  pour l'échantillon coloré, et d'autre part  $L$  pour l'échantillon neutre. Le rapport  $\frac{L}{Y}$ , voisin de 1 pour les couleurs jaunes, augmente pour le rouge et le bleu avec la saturation. Un système d'équations du deuxième degré, proposé par Sanders et Wyszecki pour exprimer les résultats expérimentaux, a donné une approximation qui doit être considérée comme excellente étant donné la difficulté des égalisations hétérochromes. Cette équation représente, dans l'espace C.I.E. des hyperboles. Les auteurs estiment toutefois que des surfaces d'égale luminosité, représentatives de l'espace entier des couleurs, sont d'un degré supérieur à 2. L'étude précédente avait été effectuée sans tenir compte du champ environnant. Des essais similaires, avec champ environnant, affirment la validité des résultats obtenus; deux échantillons de même luminosité par rapport à un neutre restent sensiblement égaux entre eux. Mais il y a une dépendance systématique de la luminosité  $L$  avec le fond. Aux hyperboles obtenues correspondent des courbes plus fermées avec un fond rouge et blanc, plus ouvertes avec un fond jaune et bleu. Comme il fallait s'y attendre, la luminosité diminue sur un fond de même couleur et s'accroît sur le fond complémentaire, ceci pour un  $Y$  demeurant constant.

Les résultats de Sanders et Wyszecki sont confirmés par le travail de Chapanis et Halsey, mesures effectuées sur 342 filtres colorés, répartis dans le diagramme C.I.E. en groupes de tonalités voisines, qui avaient été rendus préalablement égaux en luminosité au moyen de filtres neutres. Le rapport luminosité-luminance augmente du centre à la périphérie du diagramme dans toutes les directions, sauf dans la région du jaune où il s'inverse. Utilisant les chiffres fournis par les expériences, on peut établir les rapports  $\frac{L}{Y}$  pour les zones périphériques du diagramme. La valeur  $\frac{L}{Y}$  étant fixée arbitrairement à 1 pour le blanc, on trouve, pour les zones ci-dessous, les valeurs suivantes:

|                 |      |
|-----------------|------|
| zone bleu       | 1,12 |
| zone vert-bleu  | 1,32 |
| zone vert       | 1,40 |
| zone jaune-vert | 0,86 |
| zone jaune      | 0,79 |
| zone rouge      | 1,78 |

Le résultat nettement différent pour le jaune, dont le rapport est inférieur à l'unité, loin d'infirmer les faits d'observation, les confirme, étant donné la nature peu saturée de cette lumière.

## Conclusion de l'étude bibliographique.

Cette étude bibliographique a permis au comité de faire son choix entre les différentes solutions possibles. Il a été guidé dans ce choix par le souci d'introduire, dans le système envisagé, les données existantes les plus favorables sous tous les aspects.

On a pu, nous l'avons vu, définir que le plan de référence porterait le diagramme  $u, v$  de MacAdam, recommandé par la C.I.E. en 1959, et ayant l'avantage de donner une représentation assez rapprochée d'un espacement uniforme à l'aide d'équations de transformation très simples, qui permettent de reporter les données existantes des travaux antérieurs et exprimées en  $x$  et  $y$  du diagramme classique de la C.I.E.

Par ailleurs, il a été décidé de choisir comme référence les 24 teintes du système *DIN*, ce qui permettrait d'incorporer harmonieusement cette classification par échantillons dans le nouveau système généralisé de coordonnées colorimétriques.

On a pu ainsi définir un plan de travail destiné à conduire à un système de coordonnées colorimétriques dont la structure générale serait la suivante:

a) On dispose dans un plan horizontal, auquel on attribue un niveau d'éclairement convenablement choisi, le diagramme existant C.I.E. à espacements uniformes, recommandé depuis la session de 1959 (coordonnées  $u, v$ ).

b) On porte, dans ce plan, les 24 droites correspondant aux couleurs du système de repérage par échantillons *DIN*, normalisé en Allemagne, et sur ces droites les points de saturations identiques (échelons  $D = 1, 2, 3$ , etc.).

c) Perpendiculairement au plan du diagramme  $u, v$ , on porte, à partir de ces droites, des échelles de luminosité correspondant, pour chaque coordonnée  $u_i, v_i$ , à divers niveaux d'éclairement. La détermination de ces luminosités se ferait expérimentalement par photométrie hétérochrome.

On envisage d'employer ce système de coordonnées pour la représentation graphique du solide de Luther-Nyberg qui se trouverait ainsi raccordé au système de la C.I.E., ou de tout autre classification d'échantillons. Par ailleurs, de nombreux résultats d'études colorimétriques, par exemple sur la vision des couleurs, les effets d'adaptation, etc., pourraient s'inscrire dans le système généralisé.

## B - ETUDE EXPÉRIMENTALE.

Il s'agit donc de déterminer, dans chacun des 24 plans verticaux du système envisagé, pour des couleurs de différentes saturations, le rapport des luminances aux luminosités visuelles.



Un colorimètre à grand angle, modèle MacAdam (18) existant dans notre laboratoire, il a été décidé d'effectuer les égalisations photométriques hétérochromes sur cet instrument puisqu'il permet d'introduire rapidement, dans une des moitiés du champ colorimétrique, n'importe laquelle des chromaticités choisies.

Rappelons que, dans ce colorimètre (fig. 1), le faisceau lumineux, après avoir traversé trois filtres rouge, vert et bleu, est renvoyé dans une sphère d'intégration. L'observateur perçoit la lumière issue de cette sphère comme une plage uniforme par projection dans son oeil à l'aide d'une lentille de

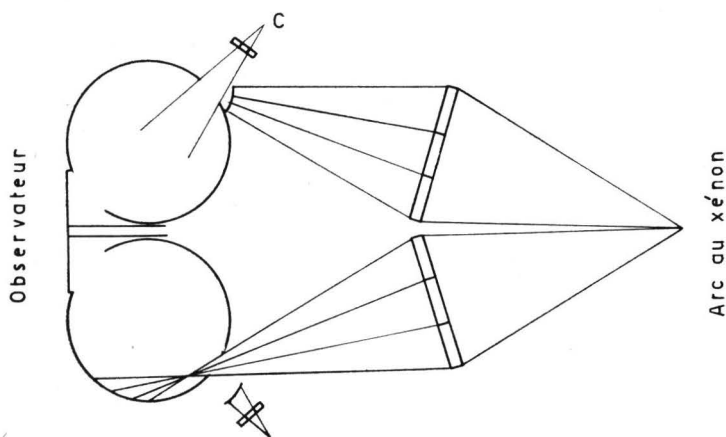


FIG. 1

Fresnel. L'appareil possède deux moitiés symétriques pour permettre des égalisations colorimétriques. Etant destiné, dans notre cas, à des égalisations photométriques, le colorimètre n'a été employé dans sa forme initiale que sur une moitié, tandis que l'autre sphère d'intégration, éclairée par l'illuminant C, a servi d'étalon de luminosité. Huit observateurs, désignés par le comité et dont la vision avait été reconnue normale à l'aide du test de Munsell dit des « 100 teintes », ont effectué les égalisations de la façon suivante: après réglage d'une couleur donnée dans le champ droit du photomètre, on ajuste l'intensité lumineuse de celui-ci par interposition de filtres gris neutres dans le faisceau à l'aide d'un luxmètre et d'une cellule Photronic Weston modèle 594 munie d'un filtre Viscor et ayant la sensibilité de l'observateur normalisé de la C.I.E. Chacun des observateurs effectue ensuite l'égalisation photométrique du champ gauche, éclairé par l'illuminant C, et on mesure à nouveau le flux émanant de ce champ à l'aide de la même cellule photoélectrique.

Pour obtenir des intensités suffisantes dans la région bleue du spectre, l'instrument a été équipé d'un arc au xénon OSA-XBF de 6000 W, ce qui a nécessité quelques transformations mécaniques, ainsi qu'un refroidissement particulièrement étudié.

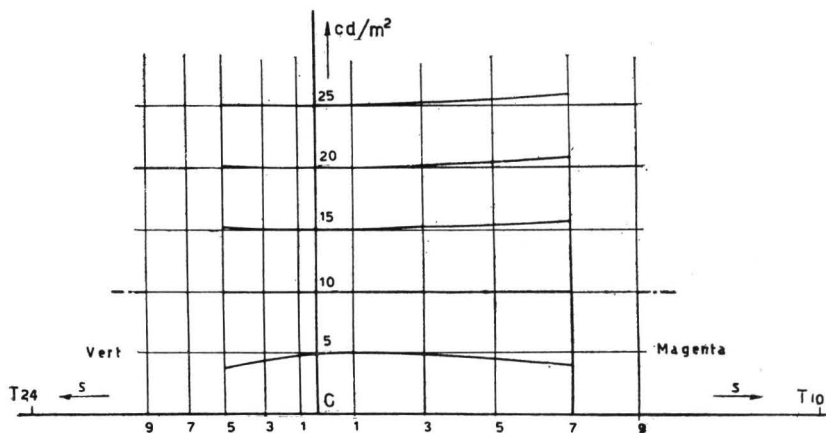


FIG. 2

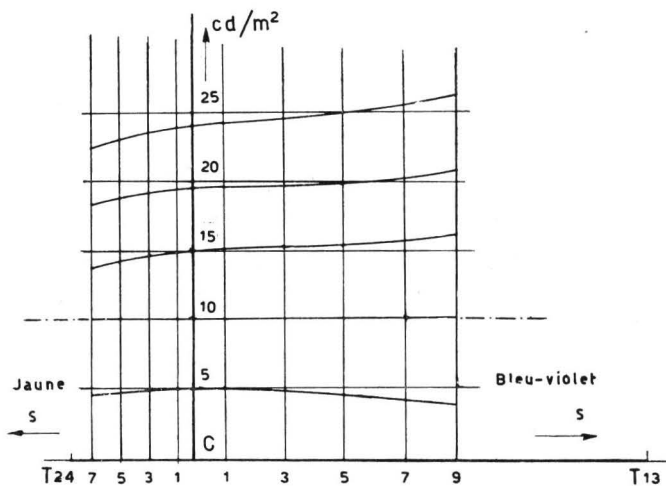


FIG. 3

Le champ photométrique était entouré d'une surface blanche mate, éclairée par l'illuminant C avec une intensité de 40 lux, et la pièce était en outre éclairée par un tube fluorescent, type lumière du jour, fournissant un éclairage d'ambiance générale favorable à l'adaptation des observateurs.

Les figures 2 et 3 montrent des résultats typiques de ces mesures.

Les courbes de la figure 2, qui correspondent aux teintes *DIN* 10, magenta, et *DIN* 21, vert, pratiquement complémentaires, indiquent, en bon accord avec les travaux antérieurs, une luminosité croissant avec la saturation. De même pour les courbes de la figure 3, obtenues avec le bleu-violet *DIN* 10 et le jaune *DIN* 24, la luminosité croît pour le bleu avec la saturation, et reste presque constante pour le jaune.

Pour l'instant, nous ne possédons pas encore assez de résultats expérimentaux pour que leur étude statistique se justifie. L'appareillage employé ne permet pas, par ailleurs, d'atteindre des niveaux d'éclairagements suffisants pour les travaux envisagés. Le Comité considère par conséquent la construction d'un photocolorimètre plus simple, mais beaucoup plus lumineux; il poursuivra ensuite la mise au point du système généralisé de coordonnées à l'aide de celui-ci. Lorsque ces travaux seront suffisamment avancés, nous nous attaquerons aux problèmes certainement pas faciles de l'interpolation dans l'ensemble du système.

#### BIBLIOGRAPHIE

- (1) W.D. WRIGHT, *Proc. Phys. Soc.*, 53, 93, (1941).
- (2) R.W. BURNHAM, *Jl. Opt. Soc. Am.*, 39, 387, (1949).
- (3) D.L. MACADAM, *Jl. Opt. Soc. Am.*, 27, 294, (1937).
- (4) D.B. JUDD, *Jl. Opt. Soc. Am.*, 25, 24, (1935).
- (5) F.C. BRECKENRIDGE et W.R. SCHAUB, *Jl. Opt. Soc. Am.*, 29, 370, (1939).
- (6) Commission Internationale de L'Eclairage, *C.R. de la 3ème réunion des experts du comité E. 1.3.1. de colorimétrie de la C.I.E.*, (1959).
- (7) G. WYSZECKI, *Jl. Opt. Soc. Am.*, 46, 982, (1956).
- (8) F.J. BINGLEY, *Jl. Opt. Soc. Am.*, 44, 109, (1954).
- (9) D.L. MACADAM, *Jl. Opt. Soc. Am.*, 32, 2, (1942).
- (10) R. LUTHER, *Z. f. techn. Phys.*, 8, 540, (1927).
- (11) N. NYBERG, *Z. f. Phys.*, 52, 406, (1928).
- (12) G. WYSZECKI, *Farbsysteme*, Berlin-Francfort, 1960.
- (13) *Munsell book of color*, Baltimore, 1943.
- (14) M. RICHTER, *Die Farbe*, 1, 85, (1953) et *Norme allemande 6164*, (1962).
- (15) C.L. SANDERS et G. WYSZECKI, *Jl. Opt. Soc. Am.*, 47, 398, 840, (1957) et 48, 389, (1958).
- (16) A. CHAPANIS et R.M. HALSEY, *Jl. Opt. Soc. Am.*, 45, 1, (1955).
- (17) R.M. HALSEY, *Jl. Opt. Soc. Am.*, 44, 199, (1954).
- (18) D.L. MACADAM, *Jl. Opt. Soc. Am.*, 40, 589, (1950).

# COMITE « BLANCHEUR »

ROBERT SEVE

Kodak-Pathé - Vincennes, France

## I - Introduction.

Le travail que le Comité d'Etude de la Blancheur de l'A.F.C. présente aujourd'hui a été inspiré par le souci de rechercher les caractères généraux de la mesure de la blancheur et de l'approfondissement de cette notion dans toutes les industries qui sont concernées par cette difficile question.

Le Comité a commencé l'étude de ce domaine très spécialisé de la Colorimétrie en s'occupant de matériaux très divers (textiles, papiers, émaux, produits vitro-cristallins, ciments, porcelaine, etc...). C'est donc nécessairement un travail d'équipe qui est effectué, dans lequel l'apport des uns et des autres et la réflexion commune sont indissolublement liés.

Le grand nombre de publications concernant ce sujet de la blancheur, a motivé au début du travail du Comité, une étude bibliographique intéressante qui se poursuit encore.

## II - Définition du blanc et de la blancheur.

Il est évidemment difficile d'étudier la blancheur sans en proposer une définition, ne serait-elle que provisoire. Or le vocabulaire de la C.I.E. est muet à cet égard, quoique la lumière blanche (achromatique) soit définie sous le numéro 15.120.

Suivant en cela la remarque préliminaire de la section Colorimétrie (15) du Vocabulaire de la C.I.E., nous avons distingué dans la définition du mot blanc, l'aspect physique de l'aspect sensoriel.

### **Blanc:**

1) - *Appliqué à un corps*

a) le diffuseur parfait;

b) par extension, corps diffusant qui possède un facteur de luminance assez élevé et à peu près constant dans toute l'étendue du spectre visible.

## 2) - *Appliqué au domaine des sensations*

Toute sensation visuelle achromatique, de luminosité élevée, donc analogue à celle provoquée par la lumière renvoyée par un corps blanc éclairé en lumière blanche.

Au sujet de la définition du mot blancheur nous avons pensé aussi qu'il était essentiel de distinguer l'aspect physique colorimétrique de l'aspect sensoriel, afin d'éviter un mauvais emploi du mot blancheur dans un sens tantôt objectif, tantôt subjectif.

Nous inspirant de la correspondance qui existe entre luminosité et luminance, entre clarté et facteur de luminance, entre saturation et pureté, nous avons attribué au mot blancheur une signification sensorielle appelant un équivalent colorimétrique objectif pour lequel nous avons — faute d'un meilleur choix — adopté l'expression degré de blancheur.

La définition de la blancheur peut alors être:

**BLANCHEUR:** Attribut complexe de la sensation visuelle d'après lequel un corps paraît plus ou moins blanc.

Nous n'avons pas actuellement de définition satisfaisante à proposer pour l'équivalent colorimétrique de la blancheur. Nous faisons simplement la remarque que le degré de blancheur peut être évalué par des méthodes variées ayant toutes un domaine de validité limité.

Bien sûr il ne nous échappe pas que nos définitions de BLANC et de BLANCHEUR n'apportent ni grande nouveauté, ni grande précision dans le domaine qui nous intéresse. Il est malheureusement impossible, à nos yeux, de faire mieux actuellement, et l'on peut dire en un sens que notre travail sur la blancheur est d'en trouver une définition satisfaisante. Mais peut-on définir la blancheur? c'est aussi à cette question ancienne que nous nous efforçons de répondre, ainsi qu'on l'exposera dans la suite.

### **III - Travail expérimental.**

Les méthodes de mesure de la blancheur sont très nombreuses, mais elles ont toujours été envisagées pour une catégorie de produits assez restreinte. Le premier travail à faire pour aborder sur un plan général l'étude de la blancheur, est donc d'examiner les caractéristiques des matériaux à étudier.

Bien que des matériaux aussi variés que les papiers, les textiles et les émaux, pour se limiter à trois exemples caractéristiques, présentent entre eux des différences liées, tout à la fois à leurs caractéristiques spectrales, à leurs propriétés diffusantes, et à leur structure, nous nous sommes limités à une comparaison des caractéristiques spectrales. Nous avons réservé pour plus tard l'examen des autres points de divergence, spécialement celui qui concerne les propriétés diffusantes.

Les courbes jointes, qui sont soit des courbes de facteur spectral de luminance, soit des courbes de facteur spectral de réflexion, suivant les appareils utilisés pour les obtenir, montrent les caractéristiques de l'ensemble des produits étudiés. Ces courbes seront complétées dans un proche avenir par celles d'autres matériaux blancs: pigments, peintures, etc.

On voit que chaque famille de produit est caractérisée par des courbes qui présentent certaines différences avec celles d'autres familles. Pour les papiers et pour les textiles, des colorants ou des produits fluorescents d'azurage perturbent plus ou moins notablement les courbes qui en leur absence présentent une croissance continue, mais à un taux qui va s'affaiblissant, quand on passe du bleu au rouge.

Les produits vitro-cristallins ont souvent une courbe qui est continuellement décroissante du bleu au rouge.

On observe de nombreux cas pour lesquels les courbes présentent un maximum dans la partie verte et jaune du spectre.

Bien que toutes les composantes trichromatiques de ces matériaux n'aient pas été encore déterminées on sait que leur longueur d'onde dominante est — sauf de très rarissimes exceptions — voisine de 578 nm ou de la complémentaire qui est 478 nm. Ce fait, qui n'est pas nouveau en ce qui concerne les produits cellulosiques, paraît être assez général; ce qui pose donc la question d'en connaître la raison profonde.

Nous avons montré par le calcul, pour la source étalon *C*, qu'un spectre de réflexion qui croît linéairement avec la longueur d'onde depuis *O* pour  $\lambda = 400$  nm suivant par conséquent la loi  $R = A (\lambda - 400)$  correspond aux coordonnées trichromatiques d'un point *M1*

$$x = 0,4217 \qquad y = 0,4095$$

Dans le cas d'un spectre qui décroît linéairement avec la longueur d'onde en s'annulant pour  $\lambda = 800$  nm suivant par conséquent la loi  $R = A (800 - \lambda)$  on trouve un point *M2* de coordonnées trichromatiques

$$x = 0,2614 \qquad y = 0,2759$$

Ces deux points de coordonnées *M1* et *M2* sont alignés avec celui du blanc étalon *C*

$$x = 0,3101 \qquad y = 0,3165$$

Nous avons montré très simplement que tout spectre régi par une loi linéaire en fonction de la longueur d'onde, suivant par conséquent la loi  $R = A \lambda + B (R > 0)$  admet un point représentatif qui se déplace sur la droite *M1 M2* suivant une loi de centre de gravité. On comprend donc que l'une des raisons de la constance de longueur d'onde dominante pour les matériaux blancs est une raison colorimétrique physique. Mais il y a aussi d'autres raisons dont la plus simple est que lorsque l'on s'écarte de cet axe on juge très rapidement que l'échantillon n'est plus blanc.

Des recherches ultérieures sont prévues sur les rapports entre la blancheur et cet axe jaune-bleu du triangle des couleurs.

#### IV - Formules de blancheur.

On sait que les formules de blancheur sont innombrables. Les plus sérieusement établies reposent sur une analyse Euclidienne de l'espace des couleurs. Ces formules peuvent être unifiées parce que leur principe est similaire. La formule type répondant à ce principe s'écrit:

$$(1) \quad W\% = 100 - \sqrt{\left(\frac{\Delta Y}{2}\right)^2 + 10^4 k (\Delta S)^2}$$

où  $\Delta Y$  est, en pourcentage, l'écart de facteur de luminance entre l'échantillon et le diffuseur parfait, et où  $\Delta S$  est l'écart colorimétrique exprimé dans le système de Mac Adam entre ces mêmes corps.

Le coefficient numérique  $k$  qui dépend des conditions d'observation peut être choisi voisin de 300 (SELLING) ou de 750 (HUNTER).

Si l'on désigne par  $A$ ,  $G$  et  $B$  les lectures en pourcentage, faites avec les filtres tristimulus d'un colorimètre trichromatique, l'un d'entre nous a montré aux Journées de la Couleur en 1961 que la formule précédente peut se mettre sous la forme pratique se prêtant aisément à des calculs numériques:

$$(2) \quad W\% = 100 - \sqrt{\left(\frac{100 - G}{2}\right)^2 + \frac{7a^2 + b^2 - 0,6ab}{(G/100)^2}}$$

où  $a = A - G$  et  $b = G - B$

On peut encore remarquer que le radical est de la forme:

$$\sqrt{x^2 + y^2} = x \sqrt{1 + \left(\frac{y}{x}\right)^2}$$

La quantité  $y/x$  n'étant ni très petite, ni très grande devant l'unité, le radical peut s'écrire approximativement:

$$x \left( a + \beta \frac{y}{x} \right) = ax + \beta y$$

ce qui revient géométriquement à remplacer la courbe représentative de la fonction  $\sqrt{1 + u^2}$  par sa tangente en un point convenablement choisi, lequel détermine  $\alpha$  et  $\beta$ .

A partir de cette remarque et en procédant à quelques approximations on peut établir que la formule (2) peut se mettre sous une forme linéaire en  $A$ ,  $G$  et  $B$  montrant ainsi que toutes les autres formules de blancheur sont des approximations — souvent intéressantes et commodes — des formules complètes du type (1).

Mais on sait, par la même occasion, que toutes ces formules ont donc un domaine de validité limité et plus particulièrement dans le cas où des produits fluorescents sont mis en jeu. Il n'en reste pas moins que ces formules de blancheur peuvent résoudre certains cas pratiques limités et que leur approfondissement même, peut encore nous réserver un enrichissement de nos connaissances. Néanmoins nous n'avons pas cru judicieux d'orienter nos efforts en ce sens.

## V - Représentations pureté-luminance.

Nous inspirant de solutions déjà publiées et appliquées bien des fois, nous avons choisi un mode d'évaluation de la blancheur par le positionnement graphique d'un point représentatif de la couleur de l'échantillon. La représentation adoptée comprend d'une part une carte des couleurs et d'autre part un diagramme où l'on porte la pureté et le facteur de luminance de l'échantillon.

La carte des couleurs est celle du système à chromaticité uniforme de Mac Adam. Nous avons néanmoins choisi la proposition de l'un d'entre nous faite aux Journées de la Couleur en 1961 de déplacer ce diagramme en plaçant le blanc  $C$  à l'origine des coordonnées. Cette méthode conduit à des calculs plus simples et permet un tracé instantané des lignes d'égale longueur d'onde dominante.

La représentation pureté-facteur de luminance est faite en portant en ordonnées le facteur de luminance en pourcentage et en portant  $200 \sqrt{k} \Delta S$  en abscisses.  $\Delta S$  est l'écart colorimétrique déjà mentionné dans la formule (1)  $k$  est le coefficient numérique qui figure dans cette même formule. Il est convenu de considérer que cette grandeur est positive si elle correspond à une longueur d'onde dominante dans le jaune, et qu'elle est négative si elle correspond à une longueur d'onde dominante complémentaire.

Cette méthode est extrêmement intéressante bien que, dans certains cas, pour les très petites valeurs de  $\Delta S$  en particulier il y ait des difficultés théoriques et pratiques.

Pourtant cette méthode soulève de très nombreuses questions que nous allons esquisser ci-après.

### A - Non-expression de la blancheur par un seul nombre.

Cette méthode ne donne pas de la blancheur une expression chiffrée. A la réflexion ceci ne paraît pas un inconvénient grave. S'il est vrai en effet, que l'on peut souvent dire de deux échantillons quel est le plus blanc, lorsque l'écart de blancheur est important, il n'en est pas de même lorsque les échantillons sont voisins. L'expérience montre alors qu'il est difficile de



classer des échantillons proches en une échelle unique de blancheur. Les différences entre échantillons apparaissent souvent comme n'étant pas uniquement quantitatives mais aussi qualitatives. Cette question est naturellement liée à celle de la définition de la blancheur.

#### *B - Possibilité de se limiter à la représentation pureté-facteur de luminance*

Dans la mesure où tous les échantillons ont même longueur d'onde dominante, la trivariance colorimétrique est réduite à une variance de deux grandeurs autorisant une représentation graphique dans un plan. On conçoit l'importance qu'il y a donc à étudier la constance de la longueur d'onde dominante pour tous les échantillons dits blancs. Pourtant on sait, et il est évident, qu'il y a une certaine dispersion colorimétrique qui fait que l'écart colorimétrique entre deux échantillons voisins ne peut être décrit que par l'intervention de trois paramètres. Le problème est donc de savoir dans quelle mesure la trivariance peut être abandonnée pour une bivariance. Le problème est expérimental et théorique, et il apparaît comme étant assez fondamental. Il est donc inscrit à notre programme futur.

#### *C - Légitimité théorique d'une représentation pureté-facteur de luminance*

Bien que n'importe quelle représentation puisse être envisagée il est nécessaire de se rappeler que dans le système de la C.I.E. l'axe neutre n'est pas perpendiculaire aux plans de luminance constante.

Il en résulte donc apparemment qu'un diagramme plan, où l'axe neutre est perpendiculaire aux lignes d'égale luminance, serait un système totalement arbitraire. Toute réflexion en ce sens nous incite à étudier les bases de la colorimétrie. C'est dire l'intérêt que nous attachons à la Commission de l'A.F.C. qui étudie ce sujet actuellement. Une publication déjà ancienne de M. Blottiau et des travaux non publiés de l'un d'entre nous, montrent que l'on peut concevoir une modification linéaire non plus seulement du triangle  $x, y$  de la C.I.E. mais de son système  $X, Y, Z$  pour amener l'axe neutre à être perpendiculaire aux plans de luminance constante. Il est vrai qu'en ce cas il est impossible de concevoir en même temps que la carte des couleurs soit totalement identifiable au système à chromaticité uniforme de MacAdam. Mais néanmoins on peut choisir les paramètres de la transformation linéaire pour que, au voisinage du blanc, et dans l'axe jaune-bleu correspondant à la longueur d'onde dominante qui nous intéresse, il y ait superposition avec la représentation pureté-facteur de luminance que nous avons adoptée. L'intérêt de cette superposition est de montrer que les lois fondamentales d'additivité qui s'appliquent au système de la C.I.E. sont également valables dans le domaine restreint qui nous intéresse pour les problèmes de blancheur.

## **VI - Perspectives d'avenir.**

En exposant nos travaux et nos réflexions nous avons déjà indiqué le programme de nos recherches à venir. Elles se regroupent en quelques grandes lignes:

### *A - Etude de la généralité de la méthode proposée*

Il faut voir, si la méthode proposée du diagramme pureté-facteur de luminance, est assez générale, assez souple et assez riche de possibilités d'exploitation, pour rendre les services qu'on attend d'elle. C'est une question de mise en oeuvre et aussi d'expérience.

### *B - Etude des comparaisons visuelles*

Il faut fixer les conditions d'une observation visuelle destinée à contrôler les méthodes objectives. Cela nécessite non seulement de choisir les sources d'éclairage ce qui est l'évidence, mais les angles solides sous-tendus par les objets examinés, les frontières contrastantes, les fonds environnants, les niveaux d'éclairement, etc... Il restera toujours difficile d'ailleurs de comparer entre eux des objets de structure différente.

### *C - Etudes colorimétriques complémentaires*

Comme nous l'avons dit, nous avons besoin d'approfondir certains points particuliers de colorimétrie, et ce travail peut être fait en liaison avec d'autres Comités d'étude. Entre autres points, le rapport entre la luminosité subjective et l'objective luminance a besoin d'être précisé.

La question de la constance de la longueur d'onde dominante des blancs doit être approfondie.

La question des systèmes colorimétriques de représentation est essentielle à la compréhension de nos problèmes.

Enfin, il nous faudra aborder la question du blanc optimum, et des tolérances qui nous feront vraiment pénétrer au coeur du sujet de la blancheur, si tant est que ce coeur existe!

# NOUVEAUX ASPECTS DE LA CHROMATOLOGIE

KARL MIESCHER

Leiter des Laboratoriums für Farbenmetrik Physikalisches Institut der Universität -  
Basel, Schweiz

RÉSUMÉ. - *Puisque les couleurs appartiennent au domaine des sensations, leur ordre (polaire) et leur métrique doivent en être dérivés, ainsi formant la base d'une métrique élémentaire des couleurs. Un tel développement s'étend de Léonard de Vinci jusqu'à Hesselgren. Les essais de mettre en relation les données subjectives avec les causes extérieures ont mené à l'introduction de l'observateur de référence colorimétrique CIE et au diagramme chromatique, base importante de la métrique inférieure des mélanges. Le développement ultérieur à une métrique supérieure (m. des échelons), inauguré par Ostwald et par Munsell, suit deux directions différentes, apparemment sans rapports mutuels. Des recherches, utilisant notre Intégrateur Spectral des Couleurs, prouvent la possibilité d'une synthèse correspondant à une métrique « naturelle » des couleurs. Mais seulement en y joignant les phénomènes de contraste et de « fluorence » selon Evans, nous pouvons embrasser la versatilité étonnante des couleurs et la rapporter aux données physiologiques. Désormais le caractère statique des systèmes présents de couleur sera remplacé par un aspect beaucoup plus dynamique.*

ZUSAMMENFASSUNG. - *Da die Farben dem Empfindungsbereich angehören, sind ihm selbst ihre (polare) Ordnung und ihre Metrik als Grundlage einer elementaren Farbenlehre zu entnehmen. Die Entwicklung reicht von Leonardo da Vinci bis Hesselgren. Das Bestreben, die subjektiven Befunde zu objektivieren, gipfelte in der Einführung des Normalbeobachters und der Farbtafel als unentbehrlicher Grundlage der sog. niedern Farbmetrik oder Mischmetrik. Die Weiterentwicklung zur höhern Metrik (Stufenmetrik) lässt, ausgehend von Ostwald und von Munsell, zwei grundsätzlich verschiedene Wege erkennen, die ohne gegenseitigen Zusammenhang blieben. Versuche mit unserem Spektralen Farbintegrator erweisen die Möglichkeit einer Synthese beider Richtungen zu einer « natürlichen » Farbmetrik. Aber erst der Einbezug der Phänomene des Kontrastes und der « Fluorenz » im Sinne von Evans erlaubt es, die erstaunliche Versatilität der Farbenwelt zu erfassen und sie mit der Physiologie der Reizübertragung zu verbinden. In Zukunft wird der starre Charakter bisheriger Farbsysteme durch eine mehr dynamische Betrachtungsweise überwunden werden.*

SUMMARY. - *As colours belong to the sphere of sensations their (polar) order, as well as their metric have to be derived thereof as a base of an elementary colour metric.*

(\*) Rapport de synthèse, VIIèmes Journées Internationales de la Couleur, Florence, le 3 mai 1963.

*Such a development extends from Leonardo da Vinci up to Hesselgren. Attempts to relate the subjective findings to their external causes led to the introduction of the CIE standard colorimetric observer and the chromaticity diagram, an important base of the inferior or mixing colour metric. The further development to a superior or scaling metric, inaugurated by Ostwald and by Munsell, followed two different directions, apparently without mutual connexion. Researches with our Spectral Colour Integrator prove the possibility of a synthesis leading to a « natural » colour metric. But only by joining the phenomena of contrast, as well as those of « fluorence » according to Evans, we are able to embrace the astonishing versatility of colours and to connect it with parallel physiological phenomena. In the future, colour systems will lose their present static character in favour of a more dynamic aspect.*

## 1. - Orientation.

Il est étonnant que la connaissance des couleurs est toujours si restreinte quoique celles-ci représentent nos expériences les plus fréquentes. Ainsi le monde des couleurs est encore un domaine véritablement sous-développé. Les connaissances acquises à l'école sont minimales, et dans nos universités la *chromatologie*, comme je propose de nommer la science des couleurs, n'est traitée qu'exceptionnellement. Par contre, sa soeur, la science des tons, est intégrée depuis longtemps dans les cours de physique au chapitre de l'acoustique.

Comme une orientation générale me semble nécessaire, j'ai essayé d'introduire la chromatologie dans le schéma de la réalité conçu par *Nicolai Hartmann* (1) (2) (fig. 1).

Le philosophe allemand, mort en 1950, imagina le tout de nos expériences comme une structure stratifiée en 4 couches, dont les deux inférieures, la couche anorganique et la couche biologique, appartiennent à l'expérience extérieure, tandis que les deux supérieures, la couche psychique et la couche mentale, concernent l'expérience intérieure. Les domaines de ces 4 couches forment l'objet de la physique et de la chimie, de la physiologie, de la psychologie, et enfin de la science en général et de l'art.

Il est important de savoir que les couleurs en tant que sensations appartiennent uniquement au domaine psychique, et c'est de là qu'il faut déduire leur classification et leur métrique. Mais comme nous le verrons, une métrique objective devra compléter la métrique purement subjective, en joignant nos sensations colorées à l'ordre des couleurs spectrales visibles qui appartient à la couche de base.

## 2. - L'ordre naturel des couleurs de Léonard de Vinci.

Nous devons à *Léonard de Vinci* (3), le grand maître de la Renaissance, né à Empoli dans la Toscane, la première classification des couleurs, et je suis particulièrement enchanté d'en parler ici, au sein de la société qui

porte son nom. *Léonard de Vinci* ramène la grande diversité des couleurs à 3 paires de couleurs opposées, une achromatique blanche-noire et deux chromatiques jaune-bleue et rouge-verte. Toutes les couleurs imaginables ne représentent que des transitions entre ces 6 couleurs de base. Du schéma de *Léonard de Vinci*, et des phénomènes de contraste décrits par lui, découle déjà l'ordre polaire de la diversité des couleurs. Une représentation spatiale en forme d'octaèdre ou de double cône s'impose, et la parenté avec les ordres de couleurs de *Hering* et d'*Ostwald* est évidente.

| Plan de réalité | Domaine d'expérience | Couleur  | Métrique objective |
|-----------------|----------------------|--|--------------------|
| Mental          | Art<br>Science       | Peinture et arts décoratifs<br>Esthétique des couleurs |                    |
| Psychique       | Psychologie          | Sensations visuelles<br>Ordre naturel des couleurs     | M. des échelons    |
| Biologique      | Physiologie          | Réception et transmission des stimuli                  | M. des mélanges    |
| Anorganique     | Physique -<br>Chimie | Energie rayonnante visible                             | M. spectrale       |

Fig. 1

Structure de la réalité (expérience) selon NICOLAI HARTMANN.

Il y a déjà 14 ans que nous avons montré(4)(5), comment par détermination expérimentale des 4 couleurs élémentaires jaune, rouge, bleue et verte, et de leurs intermédiaires, fondée sur les déterminations d'un groupe de personnes, un cercle échelonné des couleurs peut être construit d'une façon purement sensorielle. La fig. 2 le montre schématiquement, puisqu'il n'était pas possible de reproduire le cercle en couleur d'une manière satisfaisante. Les couleurs de base, ainsi que leurs moyennes, sont situées symétriquement dans le cercle. Chacune des 8 couleurs principales est présente en trois variantes, p.ex. le 1er jaune tire sur le vert, le 2ème est le jaune de base et le 3ème tire sur le rouge, et ainsi de suite. Les teintes du cercle sont numérotées de 1 à 24, mais l'espace entre elles est encore subdivisé en quarts de teinte, comme il est indiqué à la circonférence, ce qui mène à 96 teintes en tout. Une subdivision décimale se ferait aussi bien et mènerait à un cercle de 240 teintes.

Il y a 10 ans, *Hesselgren* (6)(7)(8), se basant comme nous uniquement sur des déterminations de groupes, a réalisé en forme d'atlas tout

un système « naturel » des couleurs en combinant le cercle symétrique des couleurs et la série noire-blanche, comme *Hering* (9), *Johansson* (10) et *Pope* (11) l'avaient déjà imaginé. Ainsi que *Johansson* et *Pope* il distingue quatre caractéristiques parmi les dérivés de même tonalité (fig. 3): l'intensité (vivacité, vividness en anglais) et la saturation qui déterminent le caractère chromatique, la luminosité visuelle et la clarté, qui concernent le caractère clair ou foncé d'une couleur. Les couleurs de même intensité sont situées sur

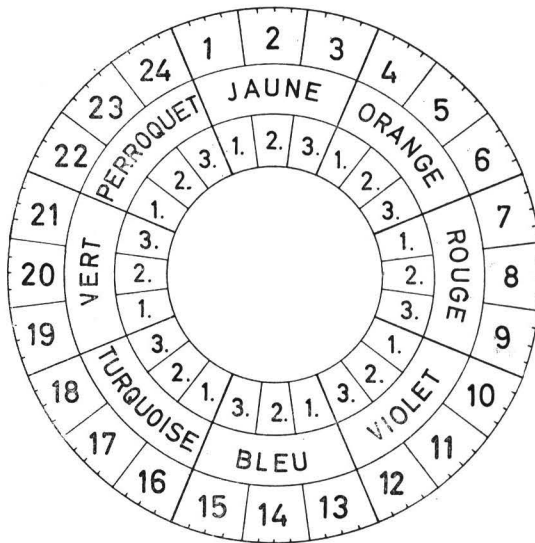


Fig. 2  
Cercle symétrique des couleurs.

des parallèles à la gamme des gris, celles de même saturation convergent vers le noir, les couleurs de même luminosité sont parallèles à la base et celles de même clarté sont représentées par des courbes de courbure un peu vague.

Il est évident que les 4 caractéristiques d'*Hesselgren* sont analogues aux deux paires « chroma » et « value » du système *Munsell* (à gauche de fig. 3), ou « saturation » et « Dunkelstufe » (degré d'obscurcissement) du système DIN de *Richter* (à droite de fig. 3). On remarque de suite que ces 2 systèmes représentent 2 aspects différents de la classification des couleurs, qui pourraient se compléter merveilleusement.

Le schéma simple en 6 couleurs de *Léonard de Vinci* nous donne sans aucun doute le meilleur accès à une classification naturelle des couleurs, et devrait par conséquent servir de point de départ dans l'enseignement élémentaire.

### 3. - Métrique objective des couleurs.

Le manque de précision et la reproductibilité imparfaite d'une classification des couleurs basée sur des données purement subjectives ne peut satisfaire à des exigences supérieures. Il faut pouvoir accrocher les sensations fugitives des couleurs à un cadre solide en fixant bien précisément

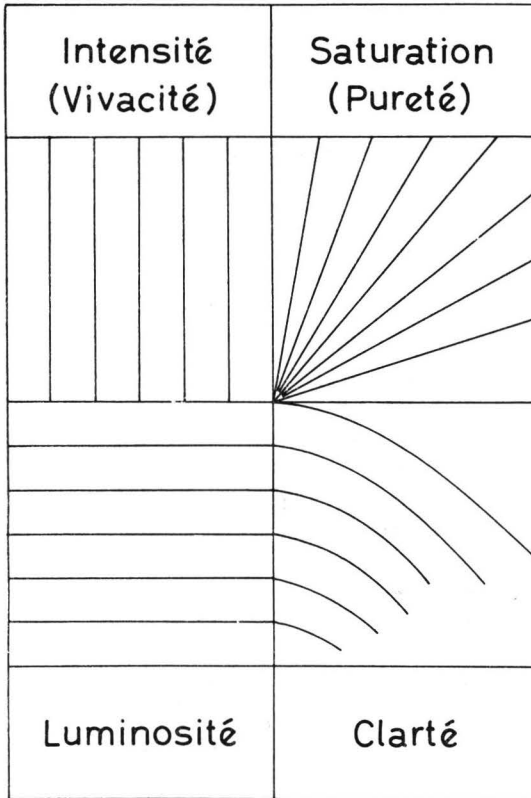


Fig. 3

Attributs des couleurs de même tonalité selon S. HESSELGREN.

les conditions. Ceci consiste, comme nous l'avons déjà mentionné, dans une combinaison des sensations colorées avec les données physiques.

Rappelons brièvement comment l'organisme surmonte le gouffre qui existe entre nos sensations et l'énergie rayonnante visible. Ce sont les récepteurs de la rétine qui, probablement grâce à 3 colorants, réduisent la diversité spectrale des longueurs d'ondes et leur intensité variable seule-

ment à 3 signaux d'intensité variée. Des résultats d'expériences récentes de *Svaetichin* (12) et d'autres (13) montrent que dans les cellules horizontales de la rétine déjà, une polarisation des informations affluantes a lieu, soutenant ainsi indirectement la théorie de *Hering* (14).

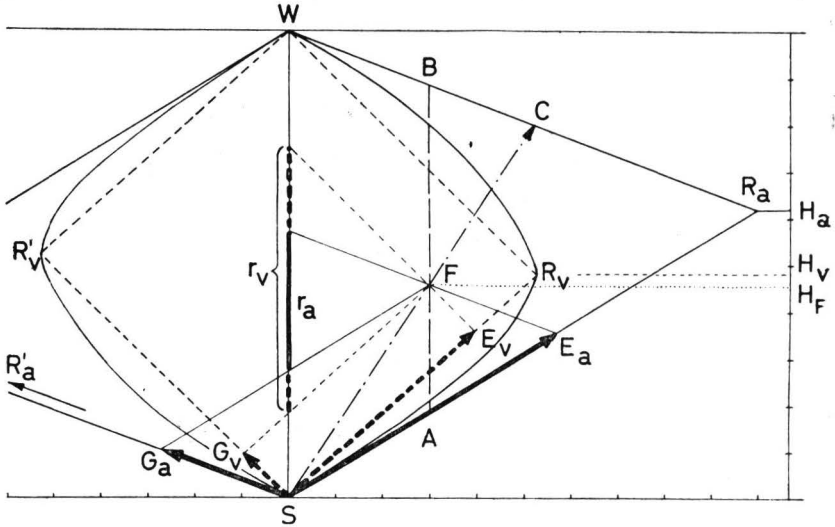


Fig. 4

Coupe antichromatique par l'axe du solide des couleurs (plan inférieur).

- S : noir ; W : blanc ; F : couleur test
- $R_v, R'_v$  : couleurs pleines opposées
- $R_a, R'_a$  : couleurs maximales opposées
- $H_a, H_v, H_F$  : luminances ( $Y$ ) de  $R_a, R_v, F$
- $E_v, E_a$  : composantes propres (Eigenfarbwerte)
- $G_v, G_a$  : composantes opposées (Gegenfarbwerte)
- $r_v, r_a$  : quantités chromatiques relatives à  $R_v$  ou  $R_a$
- AB : série des couleurs de même quantité chromatique
- SC : série des couleurs de même saturation.

L'année dernière à Munich d'ailleurs, *Svaetichin* et ses collaborateurs (15) se sont référés à leurs expériences sur la rétine d'un poisson (Téléost), qui montrent que les potentiels récepteurs réagissent de façon linéaire à l'intensité de la lumière incidente. Par contre sur le plan des cellules Glia horizontales, la réponse serait non-linéaire (sémi-logarithmique).

La métrique objective (16) suit l'exemple physiologique de près. Elle réduit la diversité spectrale aux 3 composantes trichromatiques X Y Z en premier lieu et les transforme ensuite en coordonnées polaires selon



*Schrödinger* (17), *Luther* (18) et *Adams* (19). En outre, elle distingue depuis *Ostwald* (20) entre une métrique analytique et une métrique psychologique ou d'après *Schrödinger* (21) entre une métrique inférieure linéaire (m. des mélanges) et une métrique supérieure non-linéaire (m. des échelons) qui représenterait l'équivalent de la métrique subjective.

La fig. 4 montre une représentation polaire ou antichromatique d'une coupe par l'axe du solide des couleurs au plan inférieur. A la couleur  $F$  correspondent deux paires de composantes vectorielles  $E_v G_v$  ou  $E_a G_a$ , se rapportant ou à des couleurs pleines (Vollfarben) d'*Ostwald*,  $R_v$  et  $R'_v$ , ou à des couleurs pleines maximales de saturation spectrale, les Vollfarben d'*Arens* (22)(23)  $R_a$  et  $R'_a$ . Indépendamment du choix des composantes, les couleurs de même quantité chromatique se trouvent sur des parallèles à la série des gris p.ex.  $AB$ , et celles de même saturation sur des rayons partant du point noir p.ex.  $SC$ , similairement au schéma de *Hesselgren*. Comme nous l'avons montré déjà en 1925 (24), la quantité chromatique correspond à des différences de composantes opposées  $r_v = E_v - G_v$  ou  $r_a = F_a - G_a$ , tandis que la saturation à des quotients ( $t_v = \frac{E_v - G_v}{E_v}$  ou  $t_a = \frac{E_a - G_a}{E_a}$ ) Leurs valeurs numériques diminuent en sens inverse à la pureté des couleurs de rapport.

La courbe des couleurs optimales limite les séries de même quantité chromatique ou de même saturation pour un illuminant donné.

En passant de la métrique inférieure à la métrique supérieure il faut remplacer les mesures linéaires des composantes par des mesures non linéaires, paraboliques p.ex. selon la fonction échelon quadratique de *Munsell* même ou celle des rennotations. Ainsi tous les symboles restent les mêmes et on y ajoute simplement un accent circonflexe pour indiquer qu'ils appartiennent au plan supérieur.

Les parallèles à l'axe correspondent au plan supérieur à des couleurs de même pouvoir chromatique caractérisé par la constance des différences  $\hat{E} - \hat{G} = \sqrt{E} - \sqrt{G}$ . Elles correspondent aux couleurs de même chroma de *Munsell* et à celles de même intensité ou vivacité selon *Hesselgren*. Leur intervalle sensoriel vers la série des gris reste constant, tandis que leur quantité chromatique diminue de haut en bas.

Au plan supérieur la Vollfarbe est déplacée vers le blanc dans la plupart des cas et remplacée par la couleur de pouvoir chromatique maximale. Se servant de notre Intégrateur Spectral des Couleurs (25), *Hofmann* et *Weisenborn* (26) ont déterminé la couleur maximale le long de 25 séries de couleurs optimales de même longueur d'onde dominante. Par projection verticale à la base, ces séries sont représentées dans le plan inférieur sim-

plement par des droites, provenant du point achromatique et se terminant à la Vollfarbe.

La fig. 5 montre un diagramme à base trichromatique mais en coordonnées polaires selon Adams (27). Comme différences de composantes,  $X - Y$  et  $0,4 (Y - Z)$  correspondent à des quantités chromatiques. La circonférence représente les couleurs pleines, tandis que les couleurs ma-

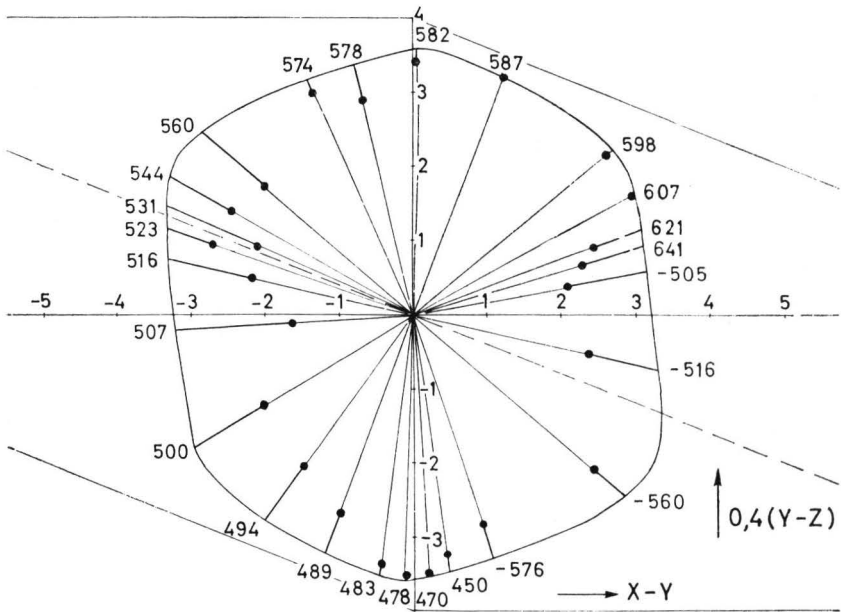


Fig. 5

Diagramme polaire selon ADAMS (plan inférieur) avec axe supplémentaire ( $X = Z$ ). Droites provenant de l'origine: 25 séries de couleurs optimales; circonférence: lieu des couleurs pleines; ● couleurs maximales déterminées expérimentalement.

ximales, déterminées par un groupe de 50 observateurs (points noirs), sont reculées à quelques exceptions, vers le centre achromatique.

En passant au plan supérieur (fig. 6), aux différences de composantes  $V_X - V_Y^*$  et  $0,4 (V_Y - V_Z)$ , les couleurs maximales déterminées de pouvoir chromatique ou de vivacité maximale se trouvent sur la courbe extérieure des couleurs maximales calculées ou lui sont très proches, tandis que cette fois, ce sont les couleurs pleines qui sont en grande partie déplacées vers le centre. Remarquons bien qu'au plan supérieur les séries de couleurs

(\*)  $V$  signifie la fonction value des rennotations.

optimales ne sont qu'exceptionnellement représentées par des droites (si elles se trouvent sur les axes), puisqu'une tonalité subjective donnée nest pas liée à une longueur d'onde dominante constante.

L'importance de l'Intégrateur des Couleurs spectrales pour des démonstrations et pour la solution de nombreux problèmes concernant les cou-

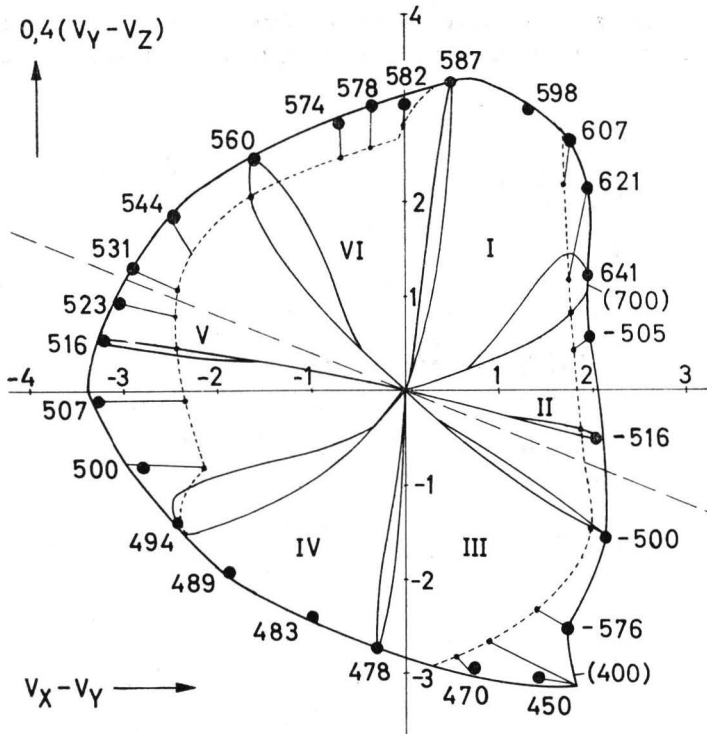


Fig. 6

Diagramme polaire selon ADAMS (plan supérieur). Circonférence: couleurs maximales calculées ( $M, \max.$ ); • couleurs max. déterminées (voir fig. 5); • couleurs pleines respectives; I à VI: secteurs correspondants du triangle des couleurs.

leurs ne peut être soulignée qu'en passant. Cet appareil se ramène à une disposition de *Newton*, et *Rösch* (28) a décrit un précurseur intéressant en 1928. *Rösch* était aussi le premier à prouver que toutes les couleurs pouvaient être représentées et mesurées comme fractions de couleurs optimales (29).

Fondés sur une même base rationnelle, les systèmes d'*Ostwald*, de

*Munsell* et de *Richter* devraient mener à une classification « naturelle » des couleurs, correspondant à notre métrique des échelons, et en accord avec la métrique purement subjective de *Hesselgren*.

#### 4. - Polarisation des couleurs par un champ environnant.

D'après *Ostwald* nous appelons « *Bezogenheit* » (relation) d'une couleur le fait que son apparence est profondément influencée par son entourage. Pour étudier cette question importante, il est recommandable de partir

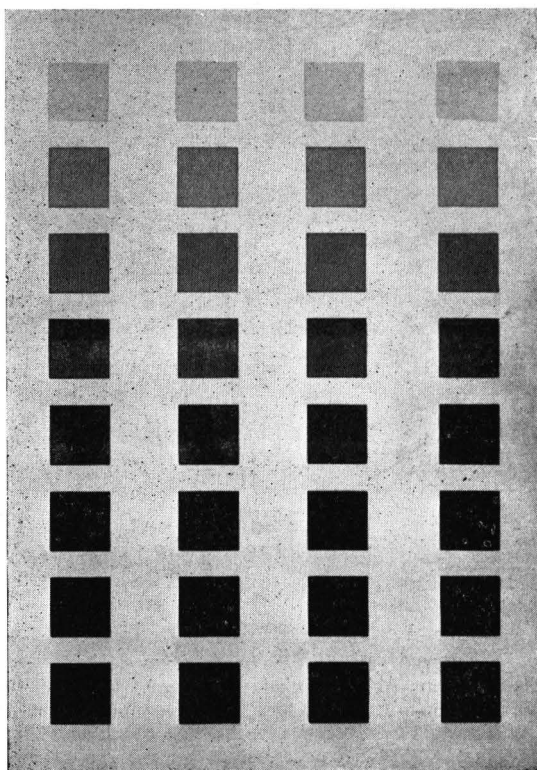


Fig. 7

4 gammes de gris-DIN derrière un masque blanc.

d'un champ environnant blanc normal, d'autant plus que la gradation régulière de la gamme des gris suit alors une fonction quadratique simple (30) (31)(32). La fig. 7 représente quatre gammes de gris *identiques* derrière un masque blanc et la fig. 8 montre les mêmes gammes sur quatre champs

extérieurs différents d'après un tableau de *Fleischer* (33), qu'il publia déjà en 1934. Malgré la rémission égale, les échelons gris au même niveau différent en degré de luminosité. En outre, on observe une polarisation des séries de gris par les champs d'entourage en échelons lumineux (éclaircis) et ombragés, de sorte, qu'à une luminosité moyenne du champ environnant, les échelles neutres semblent comme brisées en deux.

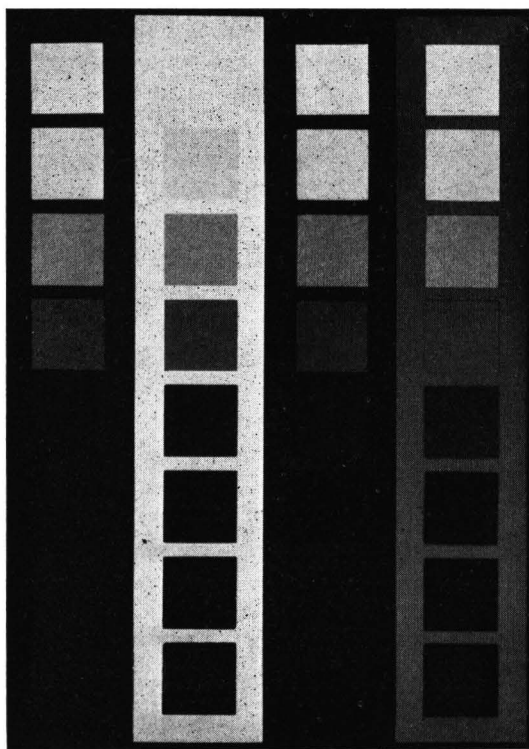


Fig. 8

Les mêmes gammes sur différents fonds selon FLEISCHER.

Le champ extérieur agit dans le sens contraire sur le champ intérieur. Quand le champ environnant devient plus foncé, le champ intérieur semble d'autant plus clair et vice versa. La polarisation est unilatérale, quand le champ extérieur correspond à l'extrémité blanche ou noire de la gamme neutre (ou quand il est plus clair resp. plus foncé que celles-ci), tous les échelons donnant alors une impression « ombragée » ou « lumineuse ». De toute façon, la fonction échelon de la gamme neutre est nettement influencée par le champ extérieur. Même si le champ environnant est blanc

normal; le champ intérieur peut devenir lumineux, c'est à dire se transformer graduellement en source de lumière, si sa luminosité dépasse, p.ex. grace à des blanchisseurs optiques, celle du blanc normal du champ environnant.

Retenons que, selon les conditions environnantes, une gamme achromatique peut être décrite par 3 paires de caractéristiques opposées comme blanc-noir, clair-foncé, lumineux-ombragé.

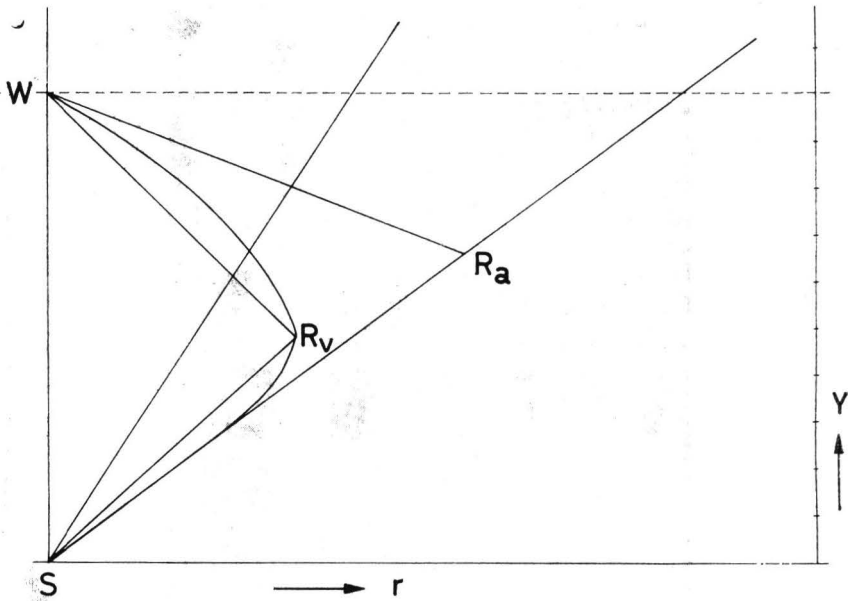


Fig. 9

Différents cours de la zone neutre entre lumineux et noirâtre.

On trouve des relations semblables pour des champs intérieurs chromatiques. Dans ce cas il est d'un intérêt particulier de déterminer la position de la zone neutre entre les aspects lumineux et ternes p.ex. dans des séries de couleurs de même saturation et tonalité, se trouvant sur un champ environnant blanc normal. Le nouveau problème semble être en rapport avec la luminosité spécifique des couleurs pures de tonalité différente, visible également dans le spectre. Un jaune foncé p.ex., entouré de blanc, paraît olivâtre, un bleu clair par contre blanchâtre. Le système *Munsell* n'en tient pas compte, mais celui d'*Ostwald* le fait, et, jusqu'à un certain degré, aussi le système allemand *DIN*.

*Ostwald* appelait toutes les nuances entre le blanc W et la couleur pleine R<sub>v</sub> « hellklar » ou « schwarzfrei », clair, exempt de noir (fig. 9),

tandis que *Richter* attribue à toutes les couleurs optimales qui correspondent à la courbe  $SR_vW$  la « Dunkelstufe » (degré d'obscurcissement) zéro. Or nous avons démontré que, sur le plan supérieur, les *Vollfarben* sont à remplacer par les couleurs de pouvoir chromatique maximal et que celles-ci divisent nettement la série des couleurs optimales en une branche blanchâtre et une branche noirâtre. La « *Vollstfarbe* » de saturation spectrale d'*Arens* et ses mélanges avec du blanc représentent une autre possibilité, mais seule l'expérience pourrait décider si  $R_aW$  (sur le plan inférieur et supérieur) représente en effet la limite neutre, ou s'il faut se rapporter à une couleur plus pure, éventuellement virtuelle, et en plus, si une telle limite neutre correspond à une droite ou à une courbe.

*Arens* (34) a déjà souligné le caractère polaire des phénomènes discutés. Je renvoie également à une publication toute récente de *Wallach* (35) aux U.S.A., mais c'est à *Ralph Evans* (36) (1959) de la maison Kodak aux Etats Unis, que nous devons des expériences quantitatives plus détaillées.

## 5. - Expériences d'Evans et chemin configuratif de Judd.

La fig. 10 représente deux séries d'expériences d'*Evans* sur des couleurs bleues et jaunes des longueurs d'ondes dominantes indiquées. Il illumine le champ intérieur par des lumières de saturation croissante. Le champ extérieur est blanc normal ( $BaSO_4$ ). Value de *Munsell* ( $V_Y$ ) et pureté chromatique ( $p_c$ ) servent de coordonnées.

*Evans* constata que:

a) des séries de couleurs semblant à l'oeil de même luminosité subjective  $B$  (Brightness) montrent (le jaune excepté) des valeurs  $V_Y$  plus ou moins diminuantes vers le côté des couleurs saturées, irrégularité qui a été déjà constatée par plusieurs auteurs (37). On remarque de suite le grand rôle joué par le champ environnant.

b) des séries de couleurs neutres, ni ombrageuses (noirâtres, grisâtres) ni lumineuses ou « fluorescentes » d'après lui ( $FL = 0$ ), toujours à l'exception du jaune, montrent des valeurs  $V_Y$  diminuant nettement plus vite que les couleurs de la même luminosité  $B$ . Un rapport entre séries neutres  $FL$  et séries de couleurs optimales (*MacAdams* limits)  $MAL$  semble encore incertain.

c) des séries de couleurs du même gris  $Gy$  sont à peu près parallèles aux séries de couleurs neutres  $FL$ , ressemblant aux séries de couleurs de même noir d'*Ostwald*.

d) au-dessus des séries de couleurs de la même luminosité  $B$ , le seuil d'éblouissement ( $IL$ ) est atteint remarquablement vite.

Quoiqu'*Evans* considère les présents résultats de quatre observateurs comme provisoires, ils sont de toute importance pour l'ordre et la métrique des couleurs. La publication contient encore maintes observations supplémentaires sur l'effet polarisant du champ environnant, qui méritent également une attention toute particulière.

Un champ extérieur, chromatique lui aussi, cause encore des déplacements supplémentaires de la couleur du champ intérieur du point du vue pouvoir chromatique, saturation et tonalité, comme je l'ai démontré en

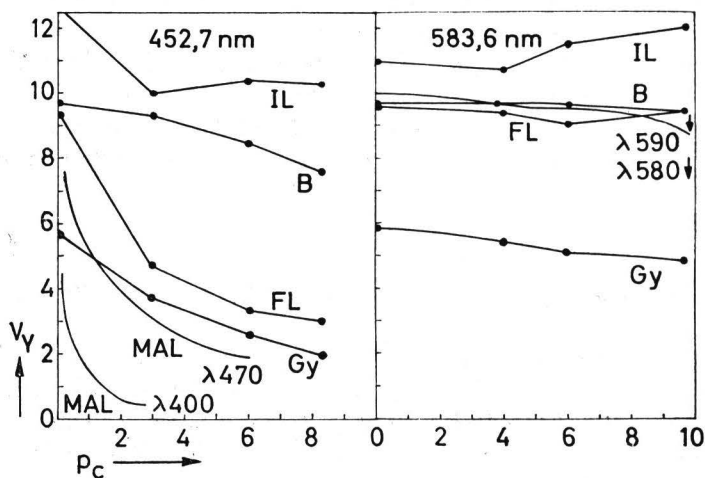


FIG. 10

2 séries d'essais d'EVANS:  $p_c$  pureté colorimétrique;  $V_Y$ : Valeur de MUNSSELL; IL: Illuminant; B: Brightness; FL: Fluorent (limite neutre); Gy: Gray; MAL: MacAdam's Limits.

1961 à Bienne (38). Ces déplacements se font de façon tout à fait régulière.

Un champ multicolore enfin ne permet, comme *Judd* (39) l'a montré récemment, qu'une évaluation sommaire. Comme l'aspect des couleurs est déterminé par des différences et des quotients de composantes, il est nécessaire de fixer la position du niveau achromatique. Dans ce but *Judd* recommande un chemin « configuratif ». La hauteur moyenne de ce niveau pourrait correspondre au champ environnant polarisant.

Retenons seulement que l'étendue des champs polarisants réciproques influence, elle aussi, la mesure du déplacement des couleurs.

## 6. - Conclusion.

Tandis que la métrique des mélanges paraît consolidée d'une façon assez satisfaisante, du moins pour des champs chromatiques de grandeur



limitée (1 à 4°), le passage à la métrique des échelons pose encore beaucoup de questions. Pourtant notre conception de la parallélité des métriques des mélanges et des échelons semble suffisamment fondée pour servir de directive aux recherches futures.

Des collections de couleurs comme celles de *Munsell* et de *Richter* sont liées strictement à des conditions définies d'adaptation locale et générale pour leur gradation, mais elles restent pourtant de grande valeur, si l'on considère les lois de déplacement en fonction des variations des champs environnants. Sans cela ces systèmes seraient d'une signification assez restreinte, en particulier pour ceux qui l'appliquent aux arts et métiers, puisque c'est justement leur relativité générale, qui caractérise les couleurs tout spécialement.

D'après une publication théorique intéressante par *Huseiyn Yilmaz*(40), parue l'année passée aux Etats Unis, les modifications de l'aspect des couleurs, soit par changement d'illumination ou par contraste, peuvent être interprétées comme déplacement de l'origine des coordonnées chromatiques et déterminées de façon analogue aux transformations de *Lorentz* selon la théorie de la relativité restreinte.

En conclusion je voudrais souligner ma conviction que désormais seul un ordre des couleurs pourra s'imposer, qui rend justice à la diversité des caractéristiques ou attributs chromatiques (dépassant de loin le nombre de trois) dans leurs relations polaires ou de contraste, décrites pour la première fois par *Léonard de Vinci*. Ce n'est qu'un tel ordre qui mérite d'être appelé « naturel ».

Bâle, le 13 juin 1963.

#### BIBLIOGRAPHIE

- (1) N. HARTMANN, *Der Aufbau der realen Welt*. Walter de Gruyter & Co., Berlin 1949, 2ème édition. Voir la 3ème partie.
- (2) K. MIESCHER, *Gegensätzlichkeit und Wirklichkeit*. *Dialectica* 9, 305 (1955).
- (3) LEONARDO DA VINCI, *Tractat von der Malerei*. Eugen Diederichs, Jena 1925, p. 185.
- (4) K. MIESCHER, *Neuermittlung der Urfarben und deren Bedeutung für die Farbforschung*. *Helv. physiol. Acta* 6. C12-C13 (1948).
- (5) K. MIESCHER, *Die Entwicklung der Farbkreismetrik seit Newton und Goethe*. *Verh. Schweiz. Naturf. Ges.* 1949, p. 125.
- (6) S. HESSELGREN, *Farbenatlas*. T. Palmer, Stockholm 1952.
- (7) S. HESSELGREN, *The Phenomenological Analysis Method and its Use in Colour Research*. Congrès FATIPEC III, 165, Spa 1955.
- (8) S. HESSELGREN, *Description of a Colour Atlas Based on Phenomenological Analysis*. Congrès FATIPEC III, 171, Spa 1955.
- (9) E. HERING, *Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn*. Engelmann, Leipzig 1905.
- (10) T. JOHANSSON, *Färg*. Stockholm 1937, 1ère édition; 1952, 2ème édition.
- (11) A. POPE, *The Language of Drawing and Painting*. Harvard University Press, Cambridge (Mass.) 1949.

- (12) S. SVAETICHIN, *The Cone Action Potential*. Acta Physiol. Scand. 29 Suppl. 106, 565 (1953).
- (13) T. TOMITA, *Electrical Activity in the Vertebrate Retina*. J. opt. Soc. Amer. 53, 49 (1963).
- (14) E. HERING, *Wiss. Abhandl.*, G. Thieme, Leipzig 1931, Nr. 42.
- (15) R. FATENCHAUD, M. LAUFER, S. SVAETICHIN ET G. MATARAI, *Communication au Congrès International d'Optique*, Munich 1962.
- (16) K. MIESCHER, K.-D. HOFMANN, P. WEISENHORN UND M. FRÜH, *Ueber das natürliche Farbsystem*. Die Farbe 10, Nr. 1/4, 115 (1961). Voir aussi corrections: Die Farbe 10, Nr. 5/6, 262 (1961).
- (17) E. SCHRÖDINGER, *Ueber das Verhältnis der Vierfarben - zur Drei - farbenlehre*. Sitz. Ber. Wiener Akad. Wiss. IIa, 134, 471 (1925).
- (18) R. LUTHER, *Aus dem Gebiete der Farbreizmetrik*. Z. techn. Physik 12, 540 (1927).
- (19) E. Q. ADAMS, *X-Z Planes in the 1931 ICI System of Colorimetry*. J. opt. Soc. Amer. 32, 168 (1942).
- (20) W. OSTWALD, voir p.ex. *Die Farbkunde*, S. Hügel Verlag, Leipzig 1923, p. 97.
- (21) E. SCHRÖDINGER, *Grundlinien einer Theorie der Farbenmetrik im Tagessehen*. Ann. Physik (IV) 63, 397, 481 (1920).
- (22) H. ARENS, *Ein Vorschlag zur Erweiterung des Farbkennzeichnungsverfahrens nach Ostwald*. Physikal. Z. 43, 43 (1942).
- (23) H. ARENS, *Farbmetrik*. Akademieverlag, Berlin 1956, 2ème édition, p. 57.
- (24) K. MIESCHER, *Beiträge zur Farbenlehre: 2. Zur Messung der Farben*. Z. f. Sinnesphysiol. 57, 72 (1925).
- (25) M. GASSER, H. BILGER, K.-D. HOFMANN UND K. MIESCHER, *Spektraler Farbintegrator*. Exper. 15, 52 (1959).
- (26) K.-D. HOFMANN UND P. WEISENHORN, *Zur Ermittlung der Farben grösster Buntkraft*. Exper. 18, 525 (1962).
- (27) E. Q. ADAMS, l.c.
- (28) S. RÖSCH, *Die Kennzeichnung der Farben*. Physikal. Z. 29, 83 (1928).
- (29) S. RÖSCH, *Fortschr. Mineral. Kristallogr. u. Italique* 13, 73, 171 (1929).
- (30) S. NEWHALL, D. NICKERSON AND D. B. JUDD, *Final Report of the OSA Subcommittee on the Spacing of the Munsell Colors*. J. opt. Soc. Amer. 33, 385 (1943).
- (31) D. B. JUDD, *Color in Business, Science and Industry*. New York 1952, p. 225.
- (32) R. M. WARREN AND R. P. WARREN, *Basis for Judgements of Relative Brightness*. J. opt. Soc. Amer. 48, 445 (1958).
- (33) E. FLEISCHER, *Graureihen*. Naturwiss. 22, 559 (1934).
- (34) H. ARENS, *Farbmetrik*. Akademieverlag, Berlin 1956, 2ème édition, p. 15.
- (35) H. WALLACH, *The Perception of Neutral Colors*. Scientific American, 107, Jan. 1963.
- (36) R. M. EVANS, *Fluorescence and Gray Content of Surface Colors*. J. opt. Soc. Amer. 49, 104 (1959).
- (37) M. RICHTER, *Das Problem der gleichhellen Farben im Tagessehen*. Die Farbe 8, 101 (1959).
- (38) K. MIESCHER, *Das Kontrastproblem und die Beziehung Farbe-Reiz*. Verh. Schweiz. Naturf. Ges., Biel 1961, p. 183.
- (39) D. B. JUDD, *Das ungelöste Problem der Farbwahrnehmung*. Palette, Nr. 10, p. 32. Sandoz Basel 1962.
- (40) H. YILMAZ, *Color Vision and a New Approach to General Perception*. Biol. Prototypes and Synth. Systems 1, 126 (1962).

# LE RENDU DES VALEURS DANS LES ECHELLES DE COULEURS

PAUL KOWALISKI

Kodak-Pathé - Vincennes, France

RÉSUMÉ. - *La variation en luminosité de l'échelle complète d'une teinte donnée, allant du noir au blanc, peut être représentée par la "courbe de luminosité" en fonction de la concentration du colorant. En admettant la validité de la loi de Beer, on exprime cette concentration par la densité analytique spectrale correspondante. La "courbe de luminosité" fournit un paramètre caractéristique de la teinte considérée, le "contraste de luminosité  $\gamma_L$ ". Celui-ci permet d'évaluer quantitativement la luminosité intrinsèque de chaque teinte et d'expliquer les effets des variations d'exposition sur le rendu des valeurs, différents pour chacune d'elles.*

La qualité photographique d'une image en noir-et-blanc n'est fonction essentiellement que de deux paramètres: la netteté et le rendu des valeurs. Ces deux propriétés importantes ont ainsi préoccupé de nombreux chercheurs depuis les débuts de la photographie, et surtout la deuxième, puisque c'est elle qui prédomine de loin dans l'évaluation de la qualité artistique d'une épreuve. Les recherches sur le rendu des valeurs en noir-et-blanc ont abouti à la méthode graphique, aujourd'hui classique, de L.A. Jones (1). Celle-ci comprend deux phases, objective et subjective, dont chacune est en général traitée séparément, mais c'est leur synthèse qui permet d'évaluer la qualité d'une reproduction en noir-et-blanc.

Dans une conférence présentée lors du 16ème Memorial Hurter et Driffield en 1949, résumant l'ensemble de ses recherches dans ce domaine, Jones (2) souligna l'importance, non seulement dans la reproduction en noir-et-blanc, mais aussi dans la photographie en couleur, d'un rendu satisfaisant des valeurs. Néanmoins, et malgré l'unanimité de tous les experts sur ce point, on ne trouve dans la bibliographie aucune mention d'études quantitatives sur le rendu des valeurs dans les échelles de couleurs. La raison de cette lacune est évidente: on sait, d'une part, que la neutralité et le bon rendu des valeurs de l'échelle de gris sont des qualités indispensables d'une

(\*) Communication No. 2319-V des Laboratoires de Recherches Kodak.

bonne photographie en couleur. En outre, la plupart des études sur la reproduction satisfaisante des couleurs se sont limitées au domaine de la chromaticité, en passant sous silence les échelles de luminosité. Toute la sensitométrie de routine des films et papiers couleur étant enfin effectuée traditionnellement sur des échelles neutres ou approximativement neutres, puisque c'est la méthode à la fois la plus commode et la plus efficace, et l'expérience pratique montrant l'importance capitale du rendu des valeurs dans la reproduction en couleurs, il a jusqu'à présent paru tout naturel de transférer la méthode de Jones, du noir et blanc à la photographie en couleur, par l'intermédiaire de l'échelle des gris (3).

Les propriétés intrinsèques des différentes teintes ayant toutefois une influence profonde sur le rendu des valeurs, non dans l'échelle neutre, mais dans leurs échelles respectives, il a paru intéressant d'étudier cet aspect de la qualité de la reproduction photographique.

La luminosité inhérente des différentes teintes est due à deux causes: d'une part à la distribution spectrale de la sensibilité de l'oeil pour toutes les couleurs, lumières, filtres et surfaces réfléchissantes; d'autre part au pouvoir de réflexion ou de transmission, très variable suivant la teinte, des colorants et pigments. C'est évidemment cette dernière cause qui se manifeste lors de l'enregistrement photographique et nous la considérerons donc en premier.

### **Effet photographique du pouvoir de réflexion ou de transmission.**

Choisissons en effet deux parallélépipèdes, l'un bleu, l'autre jaune. Les réflectances spectrales de leurs surfaces auraient les distributions de la figure 1, courbes  $B_0$  et  $Y_0$ . En les éclairant de façon appropriée par la lumière du jour, d'une température de couleur supposée de  $6100^\circ\text{K}$  (courbe  $E$ ), nous obtenons pour la distribution spectrale de la lumière réfléchie, les courbes  $B_1$  et  $Y_1$ . Les aires sous ces courbes nous fournissent la quantité de lumière réfléchie par chacun des parallélépipèdes: le jaune réfléchit 38% environ de la lumière incidente, et le bleu environ 6% seulement. Supposons une disposition de nos objets telle que schématisée dans la figure 2, avec un rapport d'éclairage entre les lumières et les ombres de 1:4. Nous voyons que les lumières de l'objet bleu ne réfléchissent que les deux tiers environ de la quantité de lumière renvoyée par les ombres de l'objet jaune. Ceci a pour effet de situer, lors de la prise de vue, chacun de ces objets dans un domaine très différent de la courbe caractéristique, et de les reproduire, de ce fait, avec des écarts de densités très différents, malgré l'égalité de leur éclairage.

Pour évaluer l'importance de cet effet, il est évidemment nécessaire de tenir compte de la sensibilité spectrale de chacune des couches de notre matériau de prise de vue. Supposant que celle-ci se fasse sur film Koda-

chrome type II à la lumière du jour, nous obtenons pour nos objets bleus et jaunes les courbes de la figure 3, qui donnent la distribution spectrale de l'effet photographique sur chacune des couches, résultant de l'éclairage,

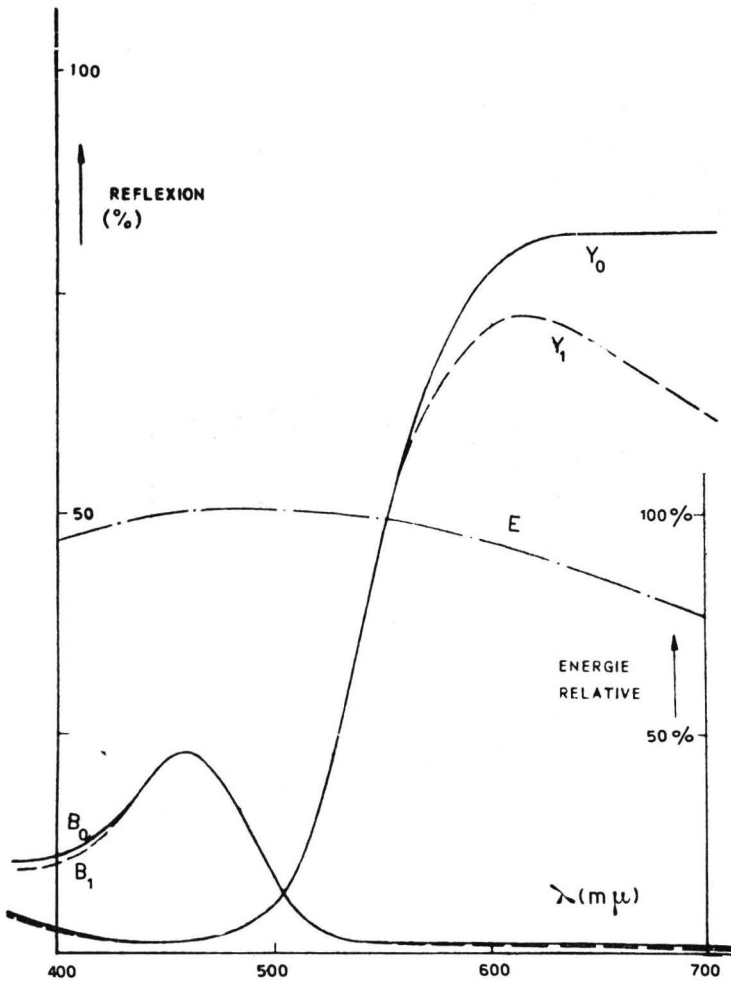


FIG. 1

de la réflectance de l'objet, de l'absorption de l'objectif, et de la sensibilité spectrale du film. Les aires sous ces courbes fournissent les valeurs relatives des expositions des trois couches par les mêmes faces des deux parallélépipèdes, resumées dans le tableau No. 1:

TABLEAU I

Valeurs relatives des expositions de chaque couche, normalisées par rapport à l'exposition d'un objet blanc sur la couche sensible au vert, en pourcents.

| Couche sensible au | R    | V    | B    |
|--------------------|------|------|------|
| Objet jaune        | 76,2 | 43,5 | 1,2  |
| Objet bleu         | 1,0  | 2,0  | 13,8 |

Portant les points correspondant à ces valeurs sur les courbes caractéristiques du film Kodachrome type II (fig. 4), nous voyons immédiatement la très grande différence entre la reproduction d'un objet jaune et d'un objet bleu. Dans les deux cas, l'exposition fournissant essentiellement la chromaticité se situe dans le domaine des densités élevées: densités intégrales bleues pour l'objet jaune, et densités intégrales rouges et vertes pour

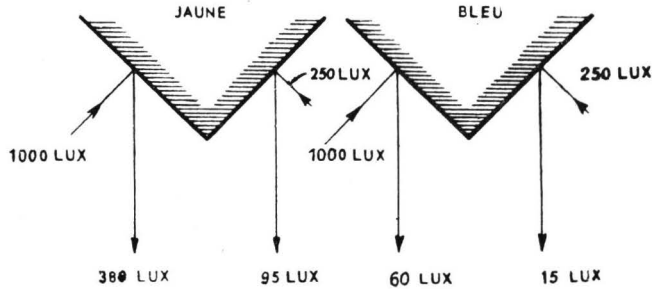


FIG. 2

l'objet bleu. Leur variation influe évidemment aussi, dans une plus faible mesure, sur la saturation et la luminosité, mais la modulation apparente en luminosité provient surtout des autres colorants. Elle est donc fournie, pour l'objet jaune, à la fois par les densités intégrales rouge et verte, et pour l'objet bleu par la densité intégrale bleue. Si cette modulation en luminosité se situe pour l'objet jaune dans le bas de la courbe, elle tombe pour l'objet bleu dans une région de densités et de contraste bien plus élevés, et s'étend de ce fait sur des écarts de densités très différents. Le tableau II donne leur valeur calculée pour un contraste d'éclaircissement de 1 à 4.

TABLEAU II

Écarts de densité entre les lumières et les ombres d'un objet jaune et d'un objet bleu, calculés pour le film Kodachrome II.

|             | R    | V    | B    |
|-------------|------|------|------|
| Objet jaune | 0,33 | 0,40 | 0,97 |
| Objet bleu  | 0,72 | 1,17 | 0,75 |

Ces chiffres montrent que la modulation en luminosité de la reproduction de l'objet bleu est environ deux fois plus forte que celle de la reproduction de l'objet jaune. On voit en outre sur la figure qu'indépen-

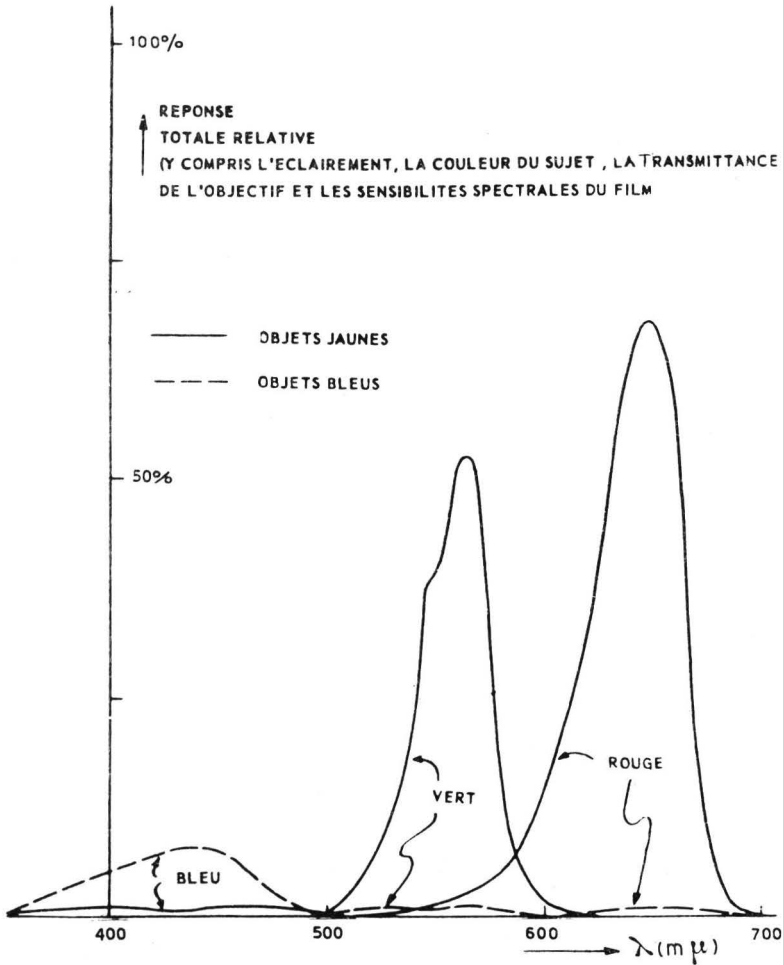


FIG. 3

amment de la forte absorption des colorants cyan et magenta superposées avec des densités élevées, l'objet bleu sera, comme dans la nature, plus sombre du fait de la densité minimale élevée du colorant qui fournit sa modulation en luminosité. On constate enfin que la modulation en luminosité est accompagnée d'une variation importante en saturation.

Ces résultats, obtenus par le calcul, permettent apparemment de prévoir une latitude d'exposition beaucoup plus grande pour l'objet jaune que pour l'objet bleu. L'essai pratique confirme cette prévision, en ce qui concerne les écarts de densité entre les lumières et les ombres. Considérons, en

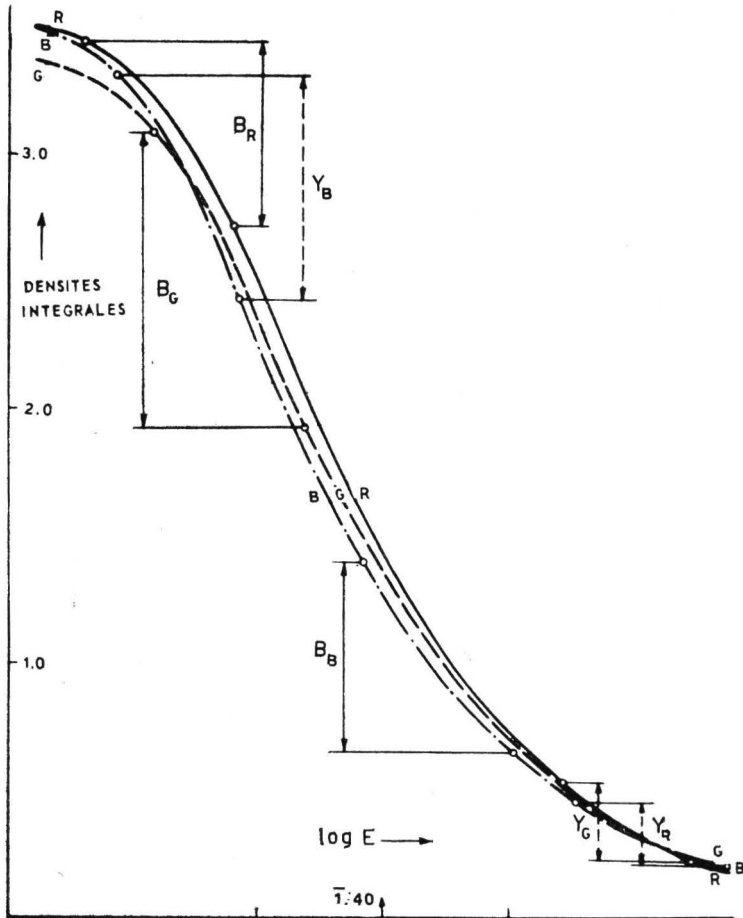


Fig. 4

effet, quelques objets jaunes, disposés sur un fond jaune, photographiés avec l'exposition normale, ainsi qu'avec une sur- et une sous-exposition d'un diaphragme respectivement \*). D'une part une vue sous-exposée ne paraît pas beaucoup plus dense qu'une vue sur-exposée, et on voit par ailleurs que

(\*) Ces figures, en couleurs, ne pouvant pas être reproduites ici, ont été omises.



ses ombres ne paraissent pas vraiment sombres, et surtout qu'elles ne tendent nullement vers le noir. Les écarts de densités ne nous renseignent toutefois que sur une partie du problème. L'examen plus approfondi des trois vues révèle en effet une insuffisance du rendu des valeurs de la vue sur-exposée, et un gain net en visibilité des détails en fonction de la sous-exposition. Nous reviendrons donc plus loin sur le point important qu'est la différence entre le rendu des valeurs et les écarts extrêmes de densités.

Considérant pour l'instant seulement ces écarts, on constate que le résultat n'est pas le même dans le cas d'objets bleus. La différence entre une vue sur-exposée et une vue sous-exposée est bien plus sensible, et nous voyons en outre que l'on atteint rapidement la limite de la latitude d'exposition du film. Sur la vue sur-exposée, les lumières de la pelote bleu clair sont presque blanches, mais sur la vue sous-exposée, les ombres de la pelote bleu foncé sont noires. Comme sur les vues d'objets jaunes, nous constatons néanmoins une divergence entre la latitude reliée aux écarts de densités, telle qu'on la considère habituellement, et celle qui tient compte du rendu des valeurs. On distingue en effet encore bien les détails de la pelote bleu saturé, aussi bien sur une vue sur-exposée que sur celle qui a été sous-exposée. Les densités des plages claires et sombres importantes de ces deux vues ont été portées sur les courbes caractéristiques du film Kodachrome type II (fig. 5). On constate une concordance satisfaisante avec les résultats obtenus par le calcul en ce qui concerne la latitude liée aux écarts de densités.

### **Luminosité apparente des couleurs.**

Il est connu que les différentes couleurs nous paraissent plus ou moins lumineuses, et de nombreuses études ont été consacrées à ce sujet. Il a d'une part préoccupé des praticiens, teinturiers, peintres, etc. qui édifiaient des systèmes de classification d'échantillons de couleurs, comme Chevreul (4), Munsell (5) et Ostwald (6), mais il a aussi été étudié par des physiciens et psychophysiciens. Il est évident que leurs conclusions convergent en ce qui concerne les aspects fondamentaux de cette question. On trouve une représentation spatiale assez complète des rapports entre les teintes, les saturations et les luminosités théoriquement possibles des couleurs matérielles dans le solide de Luther (8)-Nyberg (9).

En général, les échelles de couleurs de teinte donnée sont considérées dans ces classifications sous un double aspect: celui de la saturation où l'on considère la progression résultant du mélange d'une couleur saturée avec du blanc, et celui de la luminosité, où le rajout progressif de quantités croissantes de noir à la couleur saturée (ou de chromaticité donnée) fournit une échelle de luminosité décroissante. Il est évident, comme le montrent

les modèles spatiaux de toutes ces classifications, que les couleurs varient aussi en luminosité dans les échelles dites de saturation, et qu'elles varient aussi en saturation dans les échelles dites de luminosités\*.

Malgré cette dualité dans leur progression, l'apparence de la variation en saturation prédomine dans les premières, et celle de la variation en lumi-

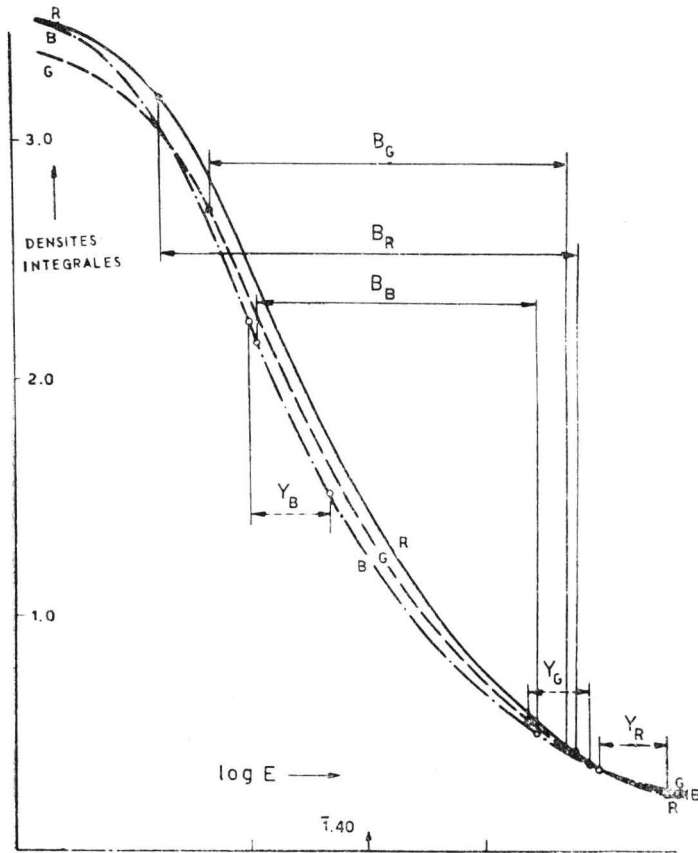


Fig. 5

nosité dans les dernières, de sorte que le langage courant les désigne suivant leur attribut visuellement prédominant. L'étude du rendu des valeurs est évidemment centrée sur l'aspect "variation de luminosité" des échelles

(\*) Dans les systèmes de classification Munsell et DIN (7), les échelles de saturation ne varient en principe pas en luminosité, et les échelles de luminosité pas en saturation, mais ceci n'empêche pas de retrouver dans ces systèmes, par un déplacement en diagonale, les progressions discutées ci-dessus.

de couleurs, et nécessite de ce fait une évaluation quantitative de la *luminosité des couleurs*. Celle-ci ("lightness") a été définie par Judd (10) comme "l'attribut permettant de classer la perception d'une couleur comme équivalente à celle d'un échelon d'une série d'objets réfléchissants achromatiques allant du noir au blanc". Cette définition implique de faire appel, pour les mesures, à la colorimétrie hétérochrome avec tous ses inconvénients et difficultés, mais elle a l'avantage de n'exiger que des égalisations de couleurs de surface, assez reproductibles et relativement faciles, et de fournir des chiffres qui correspondent bien à l'impression visuelle. Nous avons ainsi utilisé dans cette étude la méthode fondée sur cette définition et décrite par Sanders et Wyszecki (11). Elle consiste à comparer des plages

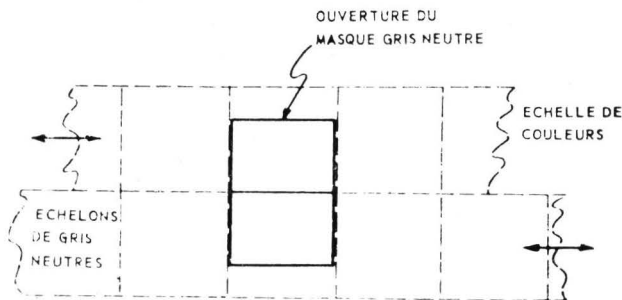


FIG. 6

de couleurs avec celles d'une échelle de gris dans une simple glissière (fig. 6), et d'attribuer comme mesure de luminosité à chaque échantillon la valeur de la densité par réflexion correspondante de l'échelle neutre employée comme étalon.

L'éclairage des deux champs de comparaison était assuré, dans notre cas, par deux tubes fluorescents Mazda lumière du jour de 40 watts, et quatre lampes incandescentes bleues de 60 watts, fournissant, sous incidence perpendiculaire dans le plan des échantillons, un éclairage visuel de lumière du jour artificielle de 760 lux \*. Cet éclairage a été choisi puisqu'il avait fait ses preuves depuis plusieurs années dans le jugement critique d'épreuves couleur à l'échelle industrielle. Les observateurs voyaient les échantillons sous 45° avec un angle de champ de 10° dans la direction de la glissière, et perpendiculairement à celle-ci. Un piège à lumière, noir, disposé derrière le champ de comparaison et face à l'observateur, éliminait

(\*) Cette valeur a été relevée à l'aide d'une cellule Photronic Weston modèle 594 munie d'un filtre Viscor, c'est-à-dire ayant une réponse correspondant à l'observateur normalisé de la CIE.

les réflexions de surface parasites. Toutes les égalisations furent effectuées par cinq observateurs.

Les échantillons examinés étaient choisis dans des échelles de couleur obtenues sur papier Ektacolor de manière à embrasser l'ensemble du domaine possible à l'aide de quelques gammes de couleur seulement. En augmentant successivement l'exposition d'une seule couche, on obtient en effet, sur le papier développé, d'abord une succession de concentrations de colorant qui correspond à une échelle de saturation. Ayant atteint la densité maximale, on peut ensuite moduler cette couleur en luminosité jusqu'au noir à l'aide des deux autres colorants. Quoique notre échelle de "saturation" diminue graduellement en luminosité, nous l'avons vu, et que notre échelle de "luminosité" varie en saturation, nous distinguons comme dans les systèmes de classification, dans cette échelle complète, les deux domaines connus, d'abord celui où l'on voit surtout varier la saturation, et ensuite, à partir de la couleur de saturation maximum, celui où l'on voit surtout la variation de luminosité. Les premières étant lumineuses, et les dernières assez sombres, elles nous paraissent distinctes, et nous les appellerons dans ce qui suit, malgré la dualité de leurs variations "échelle de saturation" et "échelle de luminosité".

Dans cette étude, nous nous sommes limités aux échelles d'un seul et de deux colorants du procédé considéré, c'est-à-dire cyan, magenta et jaune d'une part, et rouge, vert et bleu, d'autre part. Il est évident que de nombreuses autres combinaisons de colorants auraient pu être choisies. Celles-ci étant toutefois moins saturées que les six échelles mentionnées, leur étude n'aurait probablement pas fourni de résultats supplémentaires.

Les échelles de luminosité, de progressions diverses, des systèmes de classification des couleurs, ne relient pas suffisamment les propriétés physiques des colorants d'un procédé photographique à son apparence visuelle dans la reproduction pour permettre l'étude du rendu des valeurs. Nous avons donc tenté d'établir une échelle quantitative, permettant d'évaluer l'allure de la progression de luminosité en fonction de la concentration des colorants dans les couches d'un produit photographique. Ces concentrations peuvent être représentées avec une bonne approximation par leurs densités analytiques spectrales, en supposant valable la loi de Beer. En portant en ordonnées les luminosités des plages, déterminées en densité optique par les égalisations visuelles mentionnées plus haut, en fonction de leurs densités analytiques spectrales, nous obtenons dans un diagramme simple la "courbe de luminosité" qui nous renseigne mieux sur le caractère des variations en luminosité de l'échelle complète d'un colorant que les représentations spatiales des systèmes de classification de couleurs. Il fournit, en outre, en analogie avec le contraste photographique, suivant la pente de la courbe obtenue, le "contraste de luminosité  $\gamma_L$ ", caractéristique fondamentale des échelles de luminosité (fig. 7).

Les longueurs d'onde à utiliser pour la détermination des densités analytiques spectrales sont pour les colorants pris isolément par définition celles de l'absorption maximale. Pour les couleurs résultant de la présence de deux colorants, le choix entre les deux longueurs d'onde possibles est arbitraire, mais fournit pour des échantillons correctement exécutés des échelles pratiquement équivalentes. On les a donc simplement choisies suivant la commodité des essais, comme indiqué dans le tableau III qui donne aussi les longueurs d'onde choisies pour la mesure des densités analytiques spectrales des échelles de luminosité, celles-ci étant nécessairement différentes de celles utilisées pour les échelles de saturation puisque le colorant principal ne varie plus dans celles-ci.

TABLEAU III

Longueurs d'onde choisies pour la détermination des densités analytiques spectrales.

|         | <i>Echelles de "saturation"</i> | <i>Echelles de "luminosité"</i> |
|---------|---------------------------------|---------------------------------|
|         | $\lambda$                       | $\lambda$                       |
| Cyan    | 660                             | 550                             |
| Magenta | 550                             | 445                             |
| Jaune   | 445                             | 550                             |
| Rouge   | 550                             | 660                             |
| Vert    | 660                             | 550                             |
| Bleu    | 660                             | 445                             |

Pour obtenir la courbe de luminosité complète d'une échelle de couleurs allant du blanc au noir, il est enfin nécessaire de raccorder les deux échelles, celle des "saturations" et celle des "luminosités" en plaçant de façon appropriée les origines de leurs échelles de densités analytiques spectrales sur l'axe des abscisses. Nous les avons raccordées en faisant chevaucher les mesures sur les derniers échantillons des échelles de "saturation" avec celles sur les premières plages des échelles de "luminosité". On distingue ainsi dans la figures 7 très nettement les deux domaines des échelles de couleurs: à gauche les échelles de "saturation", et à droite celles de "luminosité décroissante".

L'utilité du diagramme de luminosité avec ses courbes caractéristiques de chaque couleur et la représentation de leur contraste de luminosité  $\gamma_L$  dans l'étude du rendu des valeurs de la reproduction en couleurs est bien mise en évidence en considérant un diagramme de chromaticité habituel. La figure 8 montre les chromaticités des échelles de couleurs étudiées dans le diagramme  $u-v$  de MacAdam (12). Elle confirme, d'une part, la nature connue de la variation en saturation des échelles de couleurs maté-

rielles allant du noir au blanc en passant par une teinte de saturation maximale. Mais elle montre aussi que l'omission des luminosités dans les diagrammes de chromaticité constitue une grave lacune. Les échelles du diagramme de la figure 8 ne donnent aucun renseignement sur le rendu des valeurs, si important dans la reproduction photographique. Il semble donc indispensable d'introduire aussi, dans la représentation graphique des couleurs, celle des luminosités. C'est précisément ce que nous étudions à présent dans le cadre de l'Association Française de Colorimétrie (13). Nous cher-

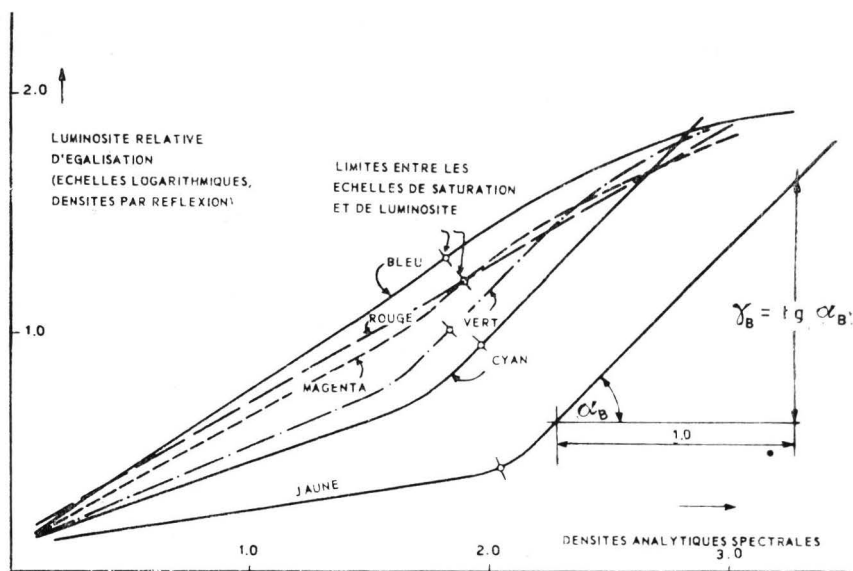


FIG. 7

chons en effet à élaborer un système généralisé de coordonnées colorimétriques qui ne permettrait pas seulement de porter dans un système de graphiques appropriés les luminosités des couleurs en plus de leurs chromaticités colorées, mais de faire en plus une synthèse entre la colorimétrie et la photométrie. Cette représentation étant encore au stade de la recherche, nous nous servons à présent des courbes de luminosité que nous venons de définir, ainsi que de la notion du contraste de luminosité  $\gamma_L$ .

### Luminosité intrinsèque des couleurs et du rendu des valeurs.

En ce qui concerne le caractère des progressions, les courbes de luminosité de la figure 7 montrent que les six couleurs principales forment

nettement deux groupes: le jaune, le cyan et le vert, d'une part, avec un changement de pente très prononcé entre les domaines de "saturation" et de "luminosité", et le magenta, le rouge et le bleu, d'autre part, avec une décroissance quasi continue de luminosité de long de l'échelle. Le premier groupe comprend les couleurs intrinsèquement lumineuses, dont les longueurs d'onde dominantes se situent au centre du spectre visible où l'oeil est le plus sensible. Le deuxième, par contre, embrasse les couleurs intrinsèquement sombres allant du rouge au bleu par le magenta, et correspondant à une sensibilité spectrale plus faible de notre oeil. On voit

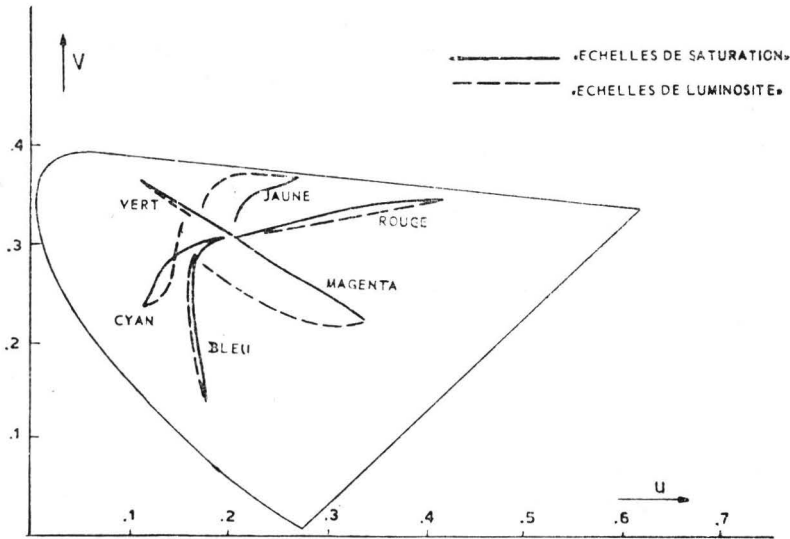


FIG. 8

en outre que la plage de concentration maximale du colorant jaune n'est pas plus sombre qu'une densité gris neutre de 0,4 environ, tandis que le bleu le plus saturé équivaut à un gris neutre d'une densité de 1,4, c'est-à-dire qu'il nous paraît dix fois plus sombre. La figure met enfin en évidence la luminosité remarquable du cyan dont la plage la plus saturée est à peine deux fois plus sombre que le jaune maximum. Ce résultat correspond de façon très satisfaisante à l'observation connue de MacAdam (14) qui trouvait une luminosité plus élevée dans un des deux champs d'un colorimètre, après avoir baissé dans ce champ l'intensité de la composante rouge. Les courbes de luminosité rouge et cyan indiquent donc que le rouge est une couleur intrinsèquement sombre. Ceci semble être en contradiction avec l'opinion courante, probablement fondée sur la bonne visibilité de fleurs ou de fruits rouges dans un entourage vert, par simple

contraste de couleurs. Mais l'effet assombrissant de la lumière rouge dans l'expérience de MacAdam et la luminosité intrinsèque de la couleur cyan, mise en évidence sur la figure 7, confirment la nature sombre du rouge évalué par rapport à une échelle neutre.

Quel est l'effet de ces différences inhérentes des échelles de luminosité sur le rendu des valeurs?

Dans une étude sur la reproduction des saturations des couleurs par les procédés photographiques, Mouchel (15) a mis en évidence la corrélation entre les saturations et les progressions en densité, dues à la variation d'éclairement du sujet dans toute reproduction photographique. Dans le cas d'une couleur simple, affectant de façon égale deux des trois sensibilités du film de prise de vue, c'est-à-dire précisément une des six couleurs considérées dans notre étude, il distingue, en fonction de l'exposition croissante, cinq zones.

Choisissons comme lui parmi ces six couleurs pour la description de cette progression, par exemple une plage bleue (fig. 9). Nous obtiendrons alors, dans la représentation simplifiée à courbe caractéristique rectiligne, les domaines suivants:

- (a) Les trois colorants sont au minimum de densité — la reproduction correspond à la surexposition totale et fournit le blanc du procédé.
- (b) Les deux colorants correspondant à la teinte du sujet (cyan et magenta) entrent seuls en modulation — la reproduction varie suivant l'échelle de "saturation".
- (c) Les trois colorants modulent — dans le cas schématique de courbes caractéristiques rectilignes, la chromaticité colorimétrique de la reproduction ne varie pas dans ce domaine en fonction de l'exposition.
- (d) Les deux colorants correspondant à la teinte du sujet atteignent leur densité maximale, le troisième seulement, le jaune, module — en diminuant graduellement l'exposition, nous obtenons dans la reproduction l'échelle de "luminosité".
- (e) Les trois colorants ont atteint le maximum de densité: la reproduction fournit le noir du procédé.

Mouchel a en outre montré que la zone (c) de cette progression se limite à une et une seule valeur d'exposition dans le cas pratique d'une courbe caractéristique ne possédant pas de tronçon rectiligne. On observe donc dans ce cas, en plus du blanc (a) et du noir (e), achromatiques, seules les échelles de "saturation" (b) et de "luminosité" (d), se rejoignant au point correspondant à la couleur la plus saturée possible du procédé pour cette teinte. Le diagramme de chromaticité de la figure 10 confirme d'ailleurs les prévisions de Mouchel, appliquées à un procédé soustractif de la pratique.



Dans cet exemple du papier Ektacolor, les échelles possibles pour chacun des trois colorants sont, comme dans tous les procédés de reproduction photographique, comprises entre les deux limites des densités minimale et maximale. Partant d'un point de pureté colorimétrique minimale, les courbes de la figure 8 se dirigent en effet d'abord vers l'extérieur du diagramme (échelles de " saturations ") pour revenir ensuite vers le centre dans la direction du neutre (échelles de " luminosités "), après avoir atteint le point correspondant à la plus grande pureté possible, c'est-à-dire à la présence dans les couches, en concentrations maximales, d'un ou de deux colorants seulement.

Jusqu'ici on ne considère que les progressions de densités qui sont fonction des concentrations des colorants. Or, nous venons de voir que l'effet de la progression en densité sur le rendu des valeurs est très différent suivant la teinte considérée. Le contraste de luminosité étant faible dans les échelles de " saturation " du jaune, du cyan et du vert, le bon rendu de valeurs de ces teintes sera plus affecté par une surexposition que celui d'un magenta, d'un rouge ou d'un bleu, dont le contraste de luminosité  $\gamma_L$  reste pratiquement constant sur toute l'échelle possible. D'une façon générale, l'effet d'une variation d'exposition sera différent suivant la teinte de la couleur à reproduire. Nous trouvons ainsi l'explication des divergences entre les latitudes d'exposition, considérées soit sous l'aspect de l'écart des densités extrêmes, soit sous celui du rendu des valeurs. Il s'avère ainsi que l'étude de la phase subjective du rendu des valeurs revêt dans la reproduction des couleurs une importance au moins aussi grande que dans celle en noir-et-blanc, sinon plus grande, parce que la trivariance de la couleur nous permet de distinguer un nombre considérablement plus élevé d'échelons juste discernables, égal en effet à la troisième puissance du nombre visible dans une échelle gris neutre.

Des essais pratiques confirment bien la sensibilité différentielle des échelles de couleurs aux variations d'exposition suivant leurs teintes. Choisissons par exemple trois coquetiers, le premier d'un rouge saturé, l'autre d'un vert saturé également, et le troisième d'un bleu pâle. (Cette figure, en couleurs, a encore été omise). Sur la première vue, surexposée d'un diaphragme, la modulation en luminosité du côté éclairé du coquetier vert est faible, malgré la saturation de sa couleur, tout comme pour le coquetier bleu désaturé. Ces expositions tombent en effet dans le bas des courbes de luminosité (fig. 7) où leur contraste de luminosité  $\gamma_L$  est trop faible pour fournir un rendu des valeurs satisfaisant. On ne voit en effet que difficilement la forme arrondie dans la partie éclairée du coquetier vert. Bien au contraire, le coquetier rouge supporte, du point de vue rendu des valeurs, très bien la surexposition: bien qu'il paraisse désaturé dans les lumières, on distingue bien sa forme puisque la courbe de luminosité du rouge a un contraste constant. Ce sont donc, dans la zone de surexposition, les couleurs intrinsèquement

sombres qui se voient avantagées sous cet aspect par rapport aux couleurs intrinsèquement lumineuses.

Considérant la zone de sousexposition, l'examen des courbes de luminosité indique par contre que les objets de couleur intrinsèquement lumineuse devraient avoir leur modelé avantagé dans cette zone puisque leur contraste de luminosité  $\gamma_L$  y est élevé dans les échelles de "luminosité". Tout en étant moins prononcé, ce fait est également confirmé par l'essai pratique: sur les vues normalement exposée et sous-exposée, les trois coquetiers ont visiblement la même forme, indépendamment de leur couleur. Leur rendu de valeurs est satisfaisant au point que l'on ne distingue que peu ces deux vues.

Examinant à nouveau les séries de vues d'objets jaunes et bleus, nous vérifions encore l'effet du contraste de luminosité sur le rendu des valeurs. Dans le cas des objets jaunes, celui-ci est en effet assez peu satisfaisant pour la vue sur-exposée où sa valeur est faible: on ne distingue certains contours qu'avec difficulté. La vue sous-exposée, qui se situe dans la zone de contraste de luminosité élevée, montre au contraire très clairement tous les détails des objets photographiés.

Pour l'objet bleu saturé, par contre, nous ne voyons pas de différence de rendu des valeurs entre la vue sur-exposée et la vue sous-exposée, tandis que l'objet bleu pâle, de couleur désaturée, se comporte comme s'il était de couleur intrinsèquement lumineuse.

## Conclusion.

Il est connu que l'étude de la qualité d'une reproduction en couleur est incomplète lorsqu'elle se limite aux chromaticités. On sait aussi que le rendu des valeurs est un aspect très important de cette qualité. Ni la seule considération d'une échelle neutre, ni l'étude de la phase objective du rendu des échelles de couleurs ne sauraient nous renseigner suffisamment: comme dans le noir-et-blanc, il est indispensable d'étudier quantitativement la phase subjective du rendu des valeurs. *Les courbes de luminosité*, qui donnent la relation dans une reproduction photographique entre les concentrations des colorants dans les couches (par l'intermédiaire de leurs densités analytiques spectrales) et les luminosités apparentes des plages correspondantes nous en fournissent le moyen par leur *contraste de luminosité*  $\gamma_L$ .

Il s'avère ainsi de façon générale que les couleurs intrinsèquement lumineuses, jaune, vert et cyan, dont les longueurs d'onde dominantes se situent au centre du spectre visible, sont, sous l'angle du rendu des valeurs, plus sensibles à la surexposition que les couleurs intrinsèquement sombres comme le rouge, le bleu et le magenta. Dans la zone de sous-exposition, nous observons l'effet contraire: ce sont les couleurs lumineuses qui se voient alors avantagées.

Quelques-uns de nos exemples, et surtout celui d'objets jaunes sur fond jaune, ont été choisis parmi des cas extrêmes pour mieux mettre en évidence le phénomène étudié. Ces cas ne se rencontrent toutefois que très rarement dans la pratique. Ceci peut expliquer pourquoi l'aspect si important du rendu des valeurs dans les échelles de couleurs a jusqu'à présent pu passer inaperçu: il est noyé sur les vues habituelles par d'autres aspects, tels que la latitude des écarts des densités extrêmes, ou le contraste de couleur dû à la juxtaposition de teintes opposées. Ceci explique aussi la latitude pratiquement très satisfaisante des procédés modernes de photographie en couleur.

Remarquons enfin que notre étude a été effectuée sur un nombre très restreint de couleurs et pour un seul produit photographique, le papier Ektacolor, qui fournit des épreuves vues par réflexion. La parfaite concordance entre les prévisions résultant de cette étude avec les essais pratiques obtenus sur film Kodachrome II, c'est-à-dire sur des diapositives vues par projection, semble confirmer la validité générale de nos conclusions.

#### RÉFÉRENCES

- (1) L. A. JONES, *On the theory of reproduction, with a graphic method for the solution of problems*, J.O.S.A. 4, (1920), 420.
- (2) L. A. JONES, *Recent developments in the theory and practice of tone reproduction*, Phot., JI. 89B, (1949), 126.
- (3) R. M. EVANS, W.T. HANSON Jr., and W. L. BREWER, *Principles of color photography*, New York & London, 1953, p. 517.
- (4) E. CHEVREUL, *De la loi du contraste simultané des couleurs*, Paris, 1839.
- (5) *Munsell book of color*, Baltimore 1929.
- (6) W. OSTWALD, *Farbnormen Atlas*, Leipzig, 1925.
- (7) M. RICHTER, *Das System der DIN-Farbenkarte*, Die Farbe, 1, (1953), 85.
- (8) R. LUTHER, *Aus dem Gebiet der Farbreizmetrik*, Z. f. techn. Phys. 8, (1927), 540.
- (9) N. NYBERG, *Zum Aufbau des Farbkörpers im Raume aller Lichtempfindungen*, Z.f. Phys. 52, (1928), 406.
- (10) D. B. JUDD, *Color in business, science and industry*, New York, 1952, p. 281.
- (11) C. L. SANDERS and G. WYSZECKY, *Correlate for lightness in terms of CIE-tristimulus values*, Part I, J.O.S.A., 47, (1957), 398.
- (12) D. L. MACADAM, *Projective transformations of I.C.I. color specifications*, J.O.S.A., 27, (1937), 294.
- (13) P. KOWALISKI, *L'intérêt d'une synthèse des repérages colorimétriques par coordonnées et par échantillons*. 6èmes Journées Internationales de la Couleur, Evian, 1962.
- (14) D. L. MACADAM, *Loci of constant hue and brightness determined with various surrounding colors*, J.O.S.A., 40, (1950), 589.
- (15) P. MOUCHEL, *La reproduction des saturations des couleurs par les procédés photographiques usuels*. 3èmes Journées Internationales de la Couleur, Bruxelles, 1959.

# L'INTERPRETATION DES COULEURS PAR LA PHOTOGRAPHIE NOIR ET BLANC

PIERRE MOUCHEL

Kodak-Pathé - Vincennes, France

RÉSUMÉ - *La sensibilisation chromatique des films de prise de vue noir-blanc est une tentative pour traduire par une représentation monochrome un sujet naturel, riche en valeurs et en couleurs. Une telle évocation du sujet original n'est possible que si l'on tient compte de ces deux paramètres. Bien qu'il semble évident, à priori, d'adopter pour un film de prise de vue la sensibilité spectrale de l'oeil, ce choix est décevant. En effet, si l'on veut distinguer des objets de même luminosité, mais de teinte différente, il faut absolument perturber le rendu exact des luminosités. Dans ce sens, la sensibilité chromatique usuelle des films noir-blanc est satisfaisante. Elle pourrait être améliorée par une diminution de la sensibilité en lumière bleu, et un léger accroissement de la sensibilité en lumière verte.*

En photographie noir-blanc, que ce soit ciné professionnel, portrait, photographie amateur, le rendu des couleurs est "camouflé" dans une restitution uniformément colorée, le plus généralement neutre. Alors que la photographie en couleur s'attache à restituer les "valeurs", brillances relatives des objets, et les "couleurs" de ces mêmes objets — les deux éléments étant d'ailleurs liés par le procédé — la photographie noir-blanc restitue couleurs et valeurs par des valeurs seules.

Cette translation d'un objet coloré à une représentation achromatique fait évidemment perdre un important facteur d'information... et de qualité. Mais la couleur n'est pas absente d'une représentation noir-blanc. L'objet photographié provoque une densité argentique qui est fonction, non seulement de sa "luminosité", mais aussi de sa "chromaticité". Au moment de la prise de vue, la brillance de l'objet est enregistrée par la sensibilité globale du film, la chromaticité de l'objet par la répartition spectrale de cette sensibilité. Des différences de sensibilité chromatique dans un film de prise de vue entraînent en noir-blanc un "rendu de couleur" différent — il est permis d'employer l'expression.

Le problème n'est pas nouveau. Aussi vieux que la photographie, il revient simplement à dire qu'une émulsion non chromatisée est moins

propre à la reproduction des objets qu'une émulsion orthochromatique, cette dernière étant encore inférieure à une émulsion panchromatique.

Ceci est de l'histoire. Mais le problème subsiste, et le fait d'avoir étendu la sensibilité à tout le spectre visible ne l'a pas résolu entièrement. Tout aussi importante est la forme spectrale de cette sensibilité.

Très récemment, des opérateurs de cinéma professionnel français s'étonnaient des résultats différents fournis dans la restitution des teintes chair par des films de prise de vue d'origines diverses. Certains films

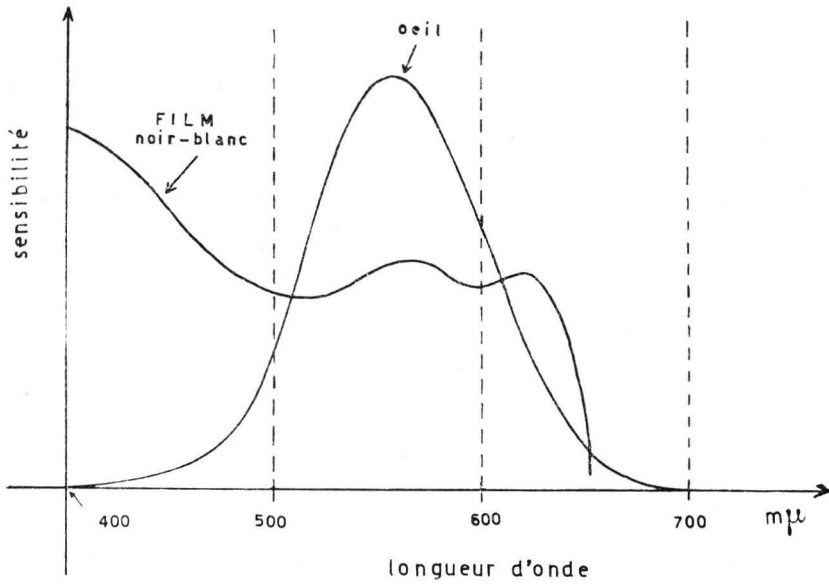


FIG. 1

Sensibilité chromatique moyenne des films noir-blanc comparée à celle de l'œil.

rajeunissent les acteurs — ce qui est flatteur, en particulier pour les dames — d'autres les vieillissent en marquant exagérément les traits du visage. Tous sont panchromatiques, tous ont sensiblement la même rapidité, mais les premiers sont relativement plus sensibles à la lumière rouge. Il fallait être aussi averti qu'un opérateur professionnel pour apprécier des différences aussi fines. En pratique, tous les films de prise de vue sont analogues, et présentent une courbe de sensibilité spectrale du même type, élevée en lumière bleue, relativement plus faible en lumière verte et en lumière rouge, limitée du côté des grandes longueurs d'onde vers 650 millimicrons (figure 1).

## La sensibilité chromatique "idéale".

Si l'on se demande naïvement ce que doit être la sensibilité chromatique d'un film de prise de vue noir-blanc, la réponse paraît évidente: celle de l'oeil. Puisque le procédé supprime les couleurs, au moins qu'il restitue les valeurs, telles qu'elles sont. Idéalement, il faut que l'examen de la photographie donne la même impression de luminances relatives que la vision de l'objet. Si un bleu est plus sombre qu'un rouge, il faut qu'à l'écran, ou sur le papier, le gris qui représente ce bleu soit plus foncé que le gris qui représente ce rouge. Au contraire, si deux couleurs sont également lumineuses, il faut que la photographie les reproduise par des gris de même densité.

Autrement dit, le film doit avoir la sensibilité spectrale de l'oeil, et ceci paraît tellement évident qu'il semble inutile d'en discuter. En pratique, la sensibilité est telle que les bleus sont exagérément éclaircis et les verts exagérément assombris. Sans précaution spéciale à la prise de vue, un ciel est blanc, un visage est blafard et un feuillage est sombre. Comme l'étalonnage est généralement fait pour les visages — sujet principal — les feuillages deviennent alors presque noirs, sans que le ciel cesse d'être pâle. Il peut se faire que des arbustes se détachent sur un ciel bleu visuellement presque aussi sombre. Aucun film noir-blanc ne peut reproduire spontanément cette scène, mais provoque toujours un éclaircissement du ciel et un assombrissement des feuillages.

La différence entre cette sensibilité "idéale" — celle de l'oeil — et la sensibilité réelle des films est grande (figure 1). Pour la faire apparaître, on a photographié trois filtres simples, respectivement bleu, vert et rouge que l'on avait choisi pour avoir la même transmission visuelle. Vus par l'oeil, sous l'illuminant *A* (2850°K) ils présentaient la même intensité lumineuse. Photographiés normalement, ils présentent une différenciation spectaculaire, puisque le filtre bleu apparaît alors 8 fois plus lumineux que le filtre rouge, lui même 2 fois plus lumineux que le filtre vert (figure 2). Pour retrouver sur la photographie une identité de densité, il a fallu interposer à la prise de vue une combinaison de filtres Wratten: filtres CC 125 Jaune, 30 Cyan et 30 Vert (figure 3). Le calcul montre qu'on transforme ainsi la sensibilité du film en une sensibilité qui est spectralement celle de l'oeil.

## Le caractère décevant de cette sensibilité "idéale".

On a réalisé un large échantillonnage, en photographiant des sujets typiquement amateurs, sans souci particulier d'esthétique, une fois avec un film de prise de vue normal, une deuxième fois avec le même film amené à avoir la sensibilité de l'oeil par la filtration définie ci-dessus (CC 125 *Y* + 30 *C* + 30 *G*). On tenait évidemment compte de la perte de rapidité. Les

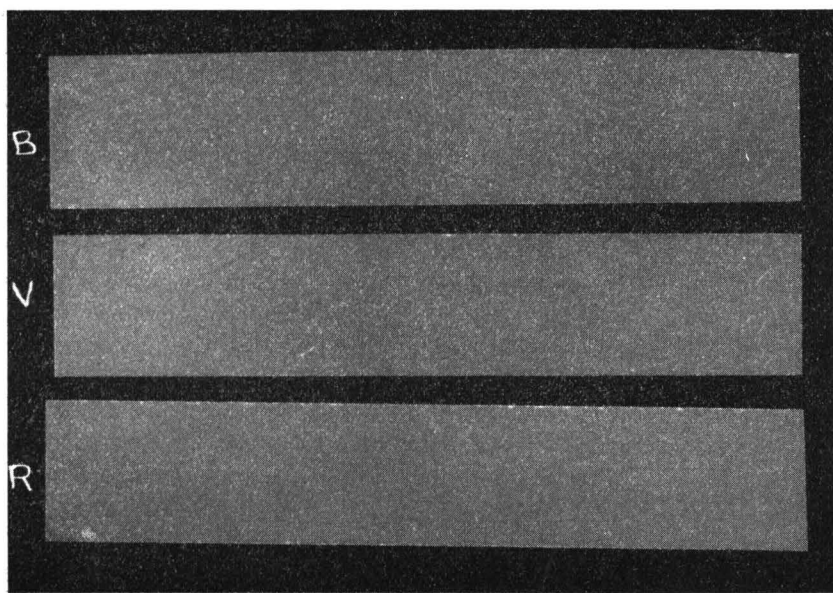


FIG. 2

Filtres Wratten n. 47, 57 et 29 ajustés pour avoir la même densité visuelle,  
photographiés avec un film ayant  
1) une sensibilité conventionnelle  
2) la sensibilité de l'œil.

négatifs obtenus on été tirés sur papier, le temps de pose étant ajusté pour donner la meilleure épreuve possible. Une seule restriction: pour chaque sujet, les deux négatifs étaient tirés sur le même grade de papier.

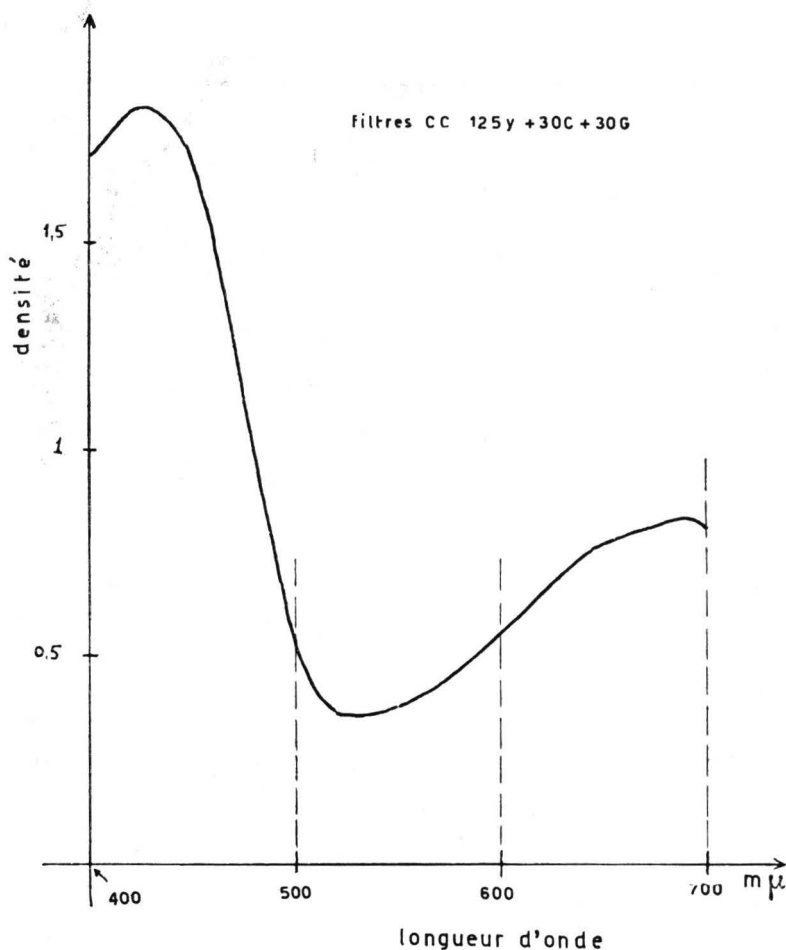


FIG. 3

Combinaison de filtre Kodak CC 125y+30 C+ 30 G nécessaire pour donner à un film de prise de vue noir-blanc la sensibilité de l'œil.

Le résultat est assez inattendu, et décevant. La sensibilité de l'œil donne une image en moyenne moins agréable que la sensibilité normale. La différence est souvent très faible, mais chaque fois qu'on la discerne, l'avantage est au film normal. Donner à un film de prise de vue la sensi-



bilité de l'oeil entraîne une image plus plate. Parfois cependant, pour un observateur attentif, la sensibilité de l'oeil fournit une épreuve objectivement plus exacte où les rapports des densités sont plus vrais (figures 4 et 5).

Ces essais conduisent à une réflexion assez simple. La photographie en couleur restitue les valeurs et les couleurs, c'est-à-dire le sujet tel qu'il était vu par l'oeil. La photographie en noir-blanc restitue les valeurs seules. Deux plages de couleurs différentes ne sont plus différenciées que par leurs densités. Si celles-ci sont très voisines, la photographie noir-blanc ne les différencie pratiquement pas, créant une grande confusion entre les différents objets photographiés.

Ceci pouvait déjà être perçu dans la photo précédente des trois filtres bleu, vert, rouge de même densité visuelle. Si le film normal les restitue avec des valeurs arbitraires et fausses, le film ayant la sensibilité de l'oeil les restitue avec leurs valeurs vraies.

Théoriquement, ce dernier est le seul valable. Cependant, aussi paradoxal que cela paraisse d'abord, la photographie normale est la meilleure, puisqu'elle montre à l'observateur trois plages différentes. Le film ayant la sensibilité de l'oeil est ici absurde, puisqu'il présente une surface uniforme là où il y avait trois objets différents. Si le procédé noir-blanc a pour but d'évoquer l'objet photographié — on ne peut guère en douter — l'évocation est ici de très loin supérieure dans le cas du film normal.

### **L'interprétation des couleurs en noir-blanc.**

On en arrive ainsi, comme c'est toujours le cas en photographie, à dépasser le domaine de la physique pour entrer dans celui de la psychologie. La photographie noir-blanc cherche à évoquer l'objet en présentant de cet objet une image vraisemblable. Il possède deux paramètres: luminosité et chromaticité. Pour que l'image noir-blanc soit vraisemblable, il faut que le seul paramètre dont elle dispose — la luminosité — contienne à la fois la luminosité et la chromaticité de l'objet. Cette synthèse n'a pas de sens physique, elle est une interprétation purement artistique. On peut en concevoir autant de formes que l'on veut.

Une forme particulière est celle que l'on a envisagé plus tôt, où la luminosité de l'image est directement liée à la luminosité de l'objet, c'est-à-dire où le film de prise de vue possède la sensibilité de l'oeil. Dans ce cas l'image est objectivement exacte pour un individu fictif incapable de discerner les couleurs. Pour un individu normal, elle est une traduction de l'objet, pas plus justifiée que beaucoup d'autres, et certainement moins agréable que beaucoup d'autres.

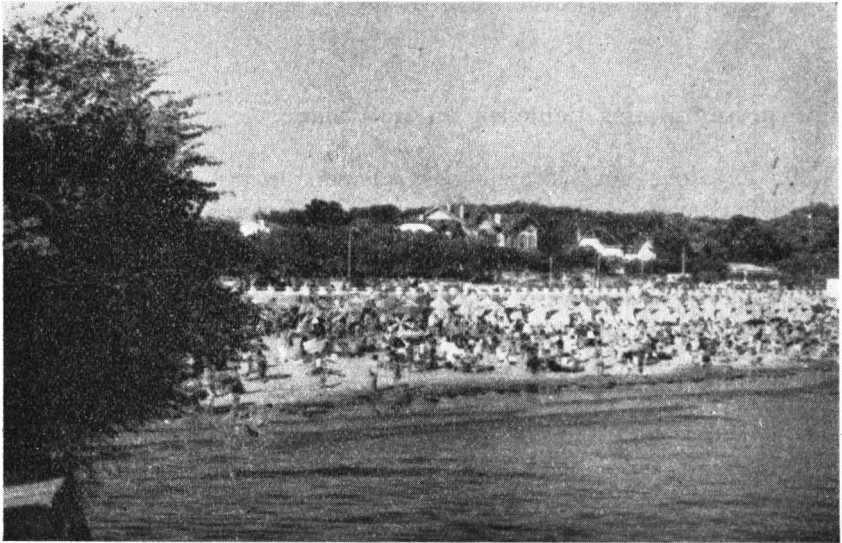
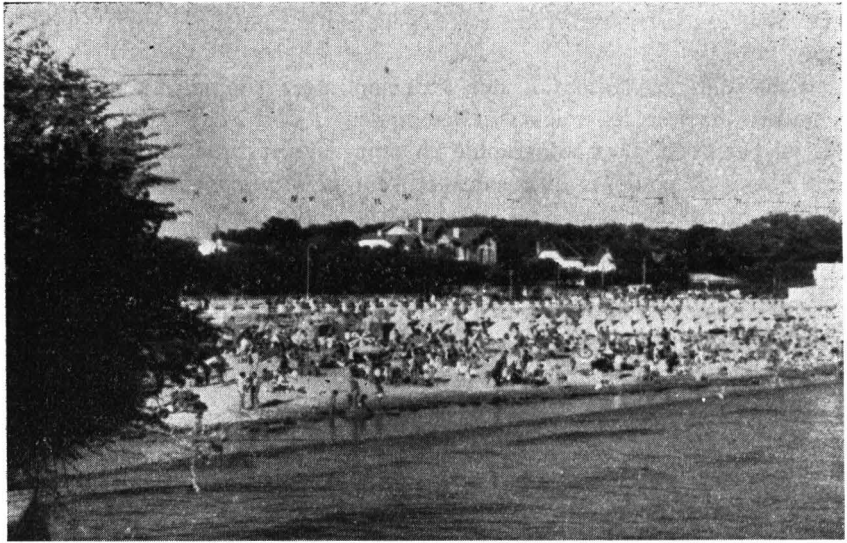


FIG. 4

Photographie d'amateur prise avec un film ayant:

- 1) une sensibilité conventionnelle
- 2) la sensibilité de l'œil.



FIG. 5

Photographie d'amateur prise avec un film ayant:

- 1) une sensibilité conventionnelle
- 2) la sensibilité de l'œil.

## 1. — *L'élévation du contraste*

Puisqu'il s'agit d'augmenter la différenciation entre les objets, la première idée qui vient à l'esprit est d'élever le contraste global du système négatif-positif.

On a appliqué cet artifice aux épreuves précédentes, élevant le contraste de 25% environ. On constate parfois une amélioration, grâce à une meilleure séparation des objets colorés, et si les résultats sont différents entre le film normal et le film ayant la sensibilité de l'oeil, on peut alors hésiter entre les deux.

Que penser de ce mode opératoire? Son seul avantage est de fournir une représentation objectivement plus exacte des luminosités. Un bleu sombre et un vert sombre présentent la même densité, et le bleu n'est plus exagérément éclairci par rapport au vert. Par contre, les mêmes bleu sombre, et vert sombre, s'ils sont juxtaposés sur l'épreuve, demeurent indifférenciés, quel que soit le contraste. L'élévation du contraste est un leurre. En outre, le rendu de valeur du système en est gravement perturbé, ce qui est visible sur quelques-uns des échantillons.

## 2. — *Le choix d'une sensibilité chromatique*

Le besoin d'une interprétation des couleurs repose sur un fait constaté: les valeurs seules sont impuissantes à différencier les objets photographiés, et à recréer l'impression globale donnée par le sujet coloré. Il faut donc créer une différenciation artificielle entre les couleurs, en assombrissant certaines, en éclaircissant d'autres, c'est-à-dire en construisant une sensibilité chromatique arbitraire, différente a priori de celle de l'oeil. La photographie traditionnelle assombrit les verts, éclaircit les rouges et surtout les bleus. C'est une interprétation parmi d'autres.

Elle est probablement involontaire. Les fabricants de surface sensibles ont fait tout leur possible pour panchromatiser les films, et tout leur possible pour en élever la rapidité. Cela a conduit à l'état actuel qui est un compromis: forte sensibilité au bleu (sensibilité naturelle), sensibilité moyenne au vert, assez forte sensibilité au rouge mais limitée assez tôt dans le spectre (vers 640-650 millimicrons). Il est peu probable que cette sensibilité chromatique soit le résultat d'un raisonnement logique, tenant compte du rendu des couleurs.

Cette interprétation se justifie en première approximation. L'amateur moyen, dans nos régions, photographie les objets les plus permanents: des personnages (dont surtout le visage est intéressant), du ciel (certainement le plus permanent), des feuillages, des pierres. Les pierres sont assez achromatiques et se soucient peu de la sensibilité du film. Quant aux objets colorés, le spectateur moyen les affecte de "valeurs de mémoire": le ciel est lumineux, les feuilles des arbres sont sombres, les visages sont clairs.

La sensibilisation actuelle des films rend bien cet équilibre, ou plutôt ce déséquilibre. Une question se pose: les films noir-blanc actuel sont-ils satisfaisants parce qu'ils traduisent la nature à peu près comme la mémoire ou l'imagination du spectateur le désire, ou au contraire le goût du spectateur s'est-il formé peu à peu par l'habitude de voir une certaine traduction constante apportée par les films noir-blanc?

Quoi qu'il en soit, une interprétation ne peut être générale, et il est facile de trouver des sujets qui ne s'en accommodent pas, ou qui en préféreraient une autre. Ceci revient à dire que tous les bleus ne sont pas des ciels lumineux, tous les verts ne sont pas des feuillages sombres, tous les rouges ne sont pas des visages clairs. En dehors de ces sujets conventionnels, l'interprétation classique de la photographie noir-blanc échoue (figures 6 et 7).

### **Le cas du portrait.**

Les exemples précédents peuvent être discutés, surtout parce qu'ils ne présentent pas un caractère général. Par contre, un cas intéressant, où l'interprétation conventionnelle est critiquable, est la photographie de personnages en gros plan, le portrait.

Les portraitistes professionnels utilisent encore souvent des films orthochromatiques pour les portraits d'homme, et au contraire des films ordinaires, avec un filtre orangé sur l'appareil de prise de vue pour les portraits de jeunes femmes et d'enfants. Dans ce dernier cas, leur but est d'obtenir une image adoucie, où la peau ne présente pas de défauts, rides, pigmentations... c'est-à-dire de provoquer un rajeunissement artificiel du sujet. Dans le premier cas au contraire, ils cherchent à marquer les traits du personnage, à en renforcer le caractère viril.

On a photographié un visage d'homme et un visage de femme, en éliminant tout autre sujet de telle sorte que l'attention de l'observateur ne soit pas troublée. On a utilisé un film de prise de vue normal, à la chromatisation duquel on a infligé une série de variations, d'abord en diminuant progressivement la sensibilité au rouge, puis en diminuant progressivement la sensibilité au vert (figures 8 et 9).

L'effet produit par ces variations est important et s'explique aisément. Schématiquement, la peau est une juxtaposition de zones rouges et jaunes. Si on intensifie la sensibilité au vert (par rapport à la sensibilité au rouge), les zones rouges de la peau sont assombries par rapport aux jaunes, la pigmentation est plus marquée. Au contraire, si on augmente la sensibilité au rouge (par rapport à la sensibilité au vert), les zones jaunes de la peau tendent à se confondre avec les rouges, le visage devient lisse et sans détail.

Devant cet éprouvé, il est intéressant de considérer les réactions des observateurs. Pour le portrait d'homme, ils préfèrent la tendance vers le

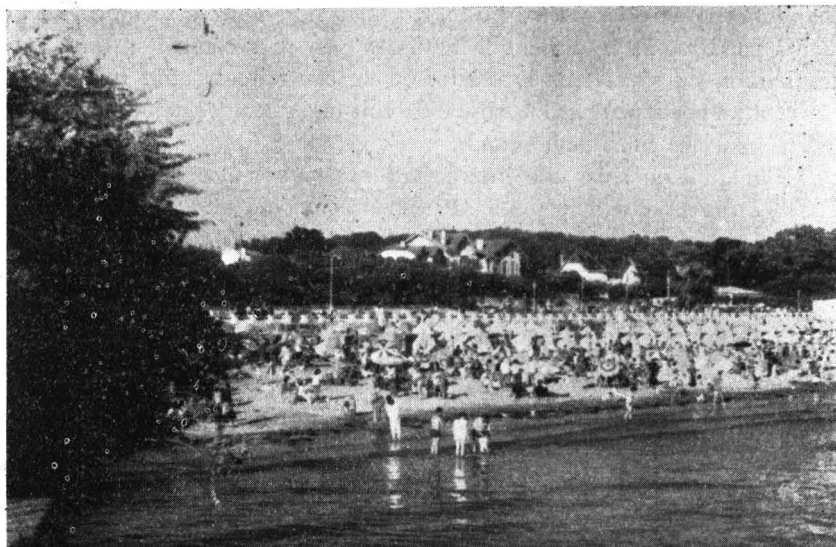


FIG. 6  
Photographie d'amateur prise avec un film présentant un excès de sensibilité en  
lumière verte.

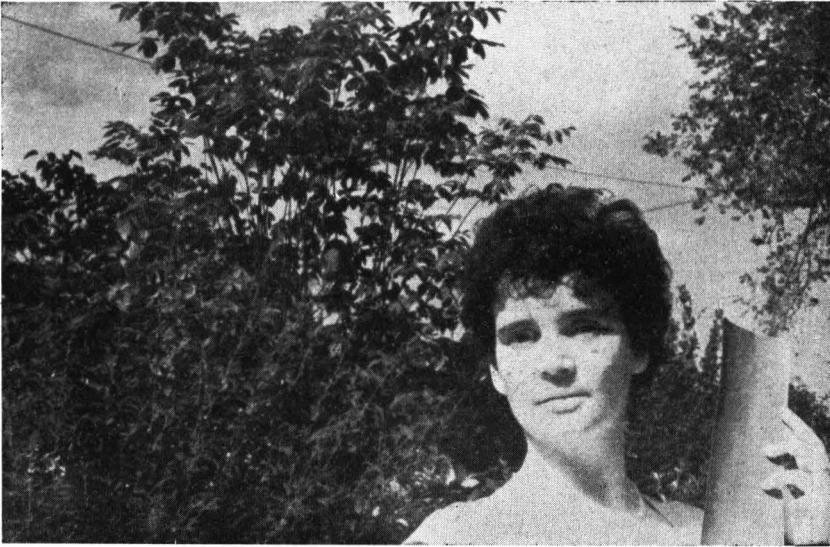


FIG. 7

Photographie d'amateur prise avec un film présentant un excès de sensibilité en lumière rouge.



FIG. 8

Portrait de femme pris avec un film présentant une variation dans le rapport de sensibilité au vert et au rouge.





FIG. 9

Portrait d'homme pris avec un film présentant une variation dans le rapport de sensibilité au vert et au rouge.

vert, comme plus exacte, plus représentative d'un visage masculin. Pour le portrait de femme, le choix est plus partagé. Certains, généralement des hommes, préfèrent la tendance verte, trouvée plus exacte. D'autres, généralement des femmes, préfèrent la tendance rouge, trouvée plus flatteuse. Le sujet lui-même préfère nettement la tendance rouge.

\* \* \*

La clé de la sensibilisation chromatique des films noir-blanc réside dans la translation tentée par ces procédés depuis un objet naturel complet riche en valeurs et en couleurs, jusqu'à une représentation monochrome. Pour être satisfaisante, cette représentation doit évoquer l'objet au souvenir de l'observateur. Une telle évocation n'est possible que si la représentation rend compte non seulement des valeurs, mais aussi des couleurs de l'objet. En ce sens, la sensibilité théorique, qui est celle de l'oeil, échoue puisqu'elle fait correspondre les valeurs de la photographie aux valeurs de l'objet, et néglige complètement la source supplémentaire d'information que les couleurs apportent à l'objet. Pour produire un effet évocateur, la sensibilité des films noir-blanc doit perturber le rendu exact des luminosités, en introduisant un élément de différenciation entre les objets de teinte différente.

Cette interprétation est nécessairement artificielle. Elle n'est pas autre chose qu'un code, une traduction. Dans la pratique, on a décidé que les bleus seraient très lumineux (à cause du ciel), les rouges clairs (à cause des fleurs et des visages de femmes), les verts sombres (à cause des feuilles). On ne peut s'attendre à ce qu'une telle interprétation soit universelle, convenne à tous les publics, à tous les sujets. D'autres seraient souvent préférables.

Si la sensibilité chromatique usuelle des films noir-blanc donne généralement satisfaction — l'habitude aidant — il y a cependant des correctifs qui reviennent constamment. Au studio, le maquillage des acteurs de cinéma est sombre, en extérieur, on emploie des filtres jaunes et jamais des filtres bleus.

Il semble bien que l'on augmenterait la satisfaction des utilisateurs en diminuant la sensibilité en lumière bleue et en élevant la sensibilité en lumière verte.

# UNE FORMULE DE BLANCHEUR SIMPLE APPLICATION AUX CIMENTS

## RESUMÉ

Communications aux 7<sup>es</sup> Journées Internationales de la Couleur

MICHELINE JEANNE

Ciments Lafarge - Bougival, France

On cherche à résoudre mathématiquement le problème de la corrélation maximale entre des observations visuelles et une formule de « blancheur ».

Dans un premier stade, on déduit qualitativement la forme, la plus simple et la meilleure, à donner à cette formule. Dans un second stade, à partir de cette forme initiale et en utilisant la statistique, on détermine l'équation exacte fournissant la solution cherchée.

Appliquée aux ciments, cette méthode a permis de résoudre le problème du contrôle de la blancheur.

### **A simple formula for whiteness; its application to cements.**

It was attempted to resolve mathematically the problem of maximal correlation between visual observations and a « formula of whiteness ».

In a first step, the simplest and best form to be given to this formula is qualitatively deduced.

In a second step, through this initial formula and using statistical methods, the exact equation giving the wanted solution is precised.

Applied to cements, this method allowed to resolve the problem of control of whiteness.

### **Eine einfache formel der weisse; anwendung in zementindustrie.**

Man hat gesucht den Problem der maximalen Korrelation zwischen Sehebeobachtungen und eine mathematische Lösung zugeben.

In einer ersten Stufe, die einfachere und die bessere Form an diesen Formeln zugeben ist qualitativ hergeleitet.

In einer zweiten Stufe, durch diese initiale Formel und durch statisti-

schen Methoden die genaue Gleichung die die erwünschte Lösung gibt, bestimmt ist.

In dem Zementgebiet, diese Methode dem Problem der Weissekontrolle eine Lösung gegeben hat.

## 1 - Position du problème.

Pour le contrôle de la teinte des produits presque blancs, on tend actuellement, à juste titre, à utiliser deux paramètres au lieu d'un (1)(12). Par contre, quand il s'agit de vendre, il est préférable de pouvoir fournir un seul nombre, aussi représentatif que possible de l'impression visuelle de « blancheur » donnée par un échantillon.

Ce problème s'étant posé pour les ciments, on essaya d'abord d'utiliser une des nombreuses formules de blancheur proposées dans la littérature, mais il apparut expérimentalement que toutes celles essayées — au nombre de quinze — conduisaient à des résultats peu satisfaisants.

En effet sur le tableau 1, où pour quatre séries de ciments blancs français ou étrangers, sont comparés successivement à l'aide du calcul statistique, le classement visuel à celui obtenu par application de chacune des diverses formules, on constate que:

1) si l'on tient pour les quatre séries à un accord significatif à 99% avec les jugements visuels, aucune des formules essayées ne convient.

2) si l'on se contente d'une significativité à 95%, seules deux formules, celles de *Selling*, satisfont à cette condition, et encore nécessitent-elles des calculs relativement longs (bien qu'une méthode récemment mise au point par Monsieur *Seve* (12) permette d'en réduire considérablement la longueur et la complexité).

Devant le problème posé par cet échec, et malgré notre répugnance à ajouter un terme de plus à une liste déjà longue, nous avons essayé d'établir une nouvelle formule de blancheur en utilisant les résultats obtenus au cours de l'étude expérimentale qui venait d'être faite.

## 2 - Etude expérimentale.

Cette étude qui avait pour but initial la seule comparaison de diverses formules de blancheur existantes est composée de deux parties distinctes: — la comparaison visuelle d'un certain nombre de ciments; — l'application à ces ciments de 15 formules de blancheur existantes, et la comparaison des résultats obtenus.

### 2.1 - Comparaison visuelle des ciments

La blancheur des ciments, ceux-ci ayant été compactés à porosité constante, a été comparée à celle de carbonate de magnésium pris comme

étalon de blanc, par une vingtaine d'observateurs dans les conditions d'éclairage et d'observation recommandées par la C.I.E.: éclairage à 45° environ par la lumière du jour, face au Nord, sans objet coloré dans le champ; observation normale.

Les observateurs n'avaient aucune expérience particulière de colorimétrie, mais une vision colorée normale (d'après le test de POLAK (10)).

Le choix des échantillons à étudier visuellement a été effectué après une étude spectrophotométrique et colorimétrique de tous les ciments blancs français et étrangers qui ont pu être réunis, au nombre de 43.

Cette première étude a montré que les courbes de distributions du facteur spectral de luminance des 43 ciments ont une même allure générale. Leur caractère essentiel est une décroissance dans les régions bleue et violette du spectre. Par contre, elles diffèrent parfois assez sensiblement dans les détails, certaines étant constamment croissantes avec la longueur d'onde, tandis que d'autres présentent un maximum vers le milieu du spectre (voir 3 exemples figure 1), ce qui se traduit colorimétriquement par une variation de la longueur d'onde dominante de 575,5 à 526 m $\mu$  (voir figure 2).

Dans ces conditions, quatre séries de 10 ciments furent constituées de telle façon que deux d'entre elles (la 2ème et la 4ème) représentent le cas général, et les deux autres, deux cas particuliers où la teinte varie nettement moins (voir tableau 2).

Le classement des ciments dans chaque série a été exécuté par comparaison deux à deux. L'expérience a montré que cette méthode, antérieurement utilisée par *Friele* (4), est longue mais de beaucoup la plus précise. Nous ne la redécrivons pas. Seule une légère modification lui a été apportée: les points attribués aux échantillons et correspondant à « plus blanc » ou « moins blanc » ont été intervertis afin que le score (\*) d'un ciment soit d'autant plus fort que celui-ci était plus blanc.

La moyenne des scores obtenus pour chaque ciment par les différents observateurs (après élimination de ceux qui avaient donné les réponses les plus aberrantes (\*\*)) est égale, par définition, à sa blancheur visuelle relative V dans sa série.

L'erreur maximale à craindre sur V a été déterminée dans chaque cas par le calcul statistique:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\sqrt{N' - 1}} t_{N' - 1}$$

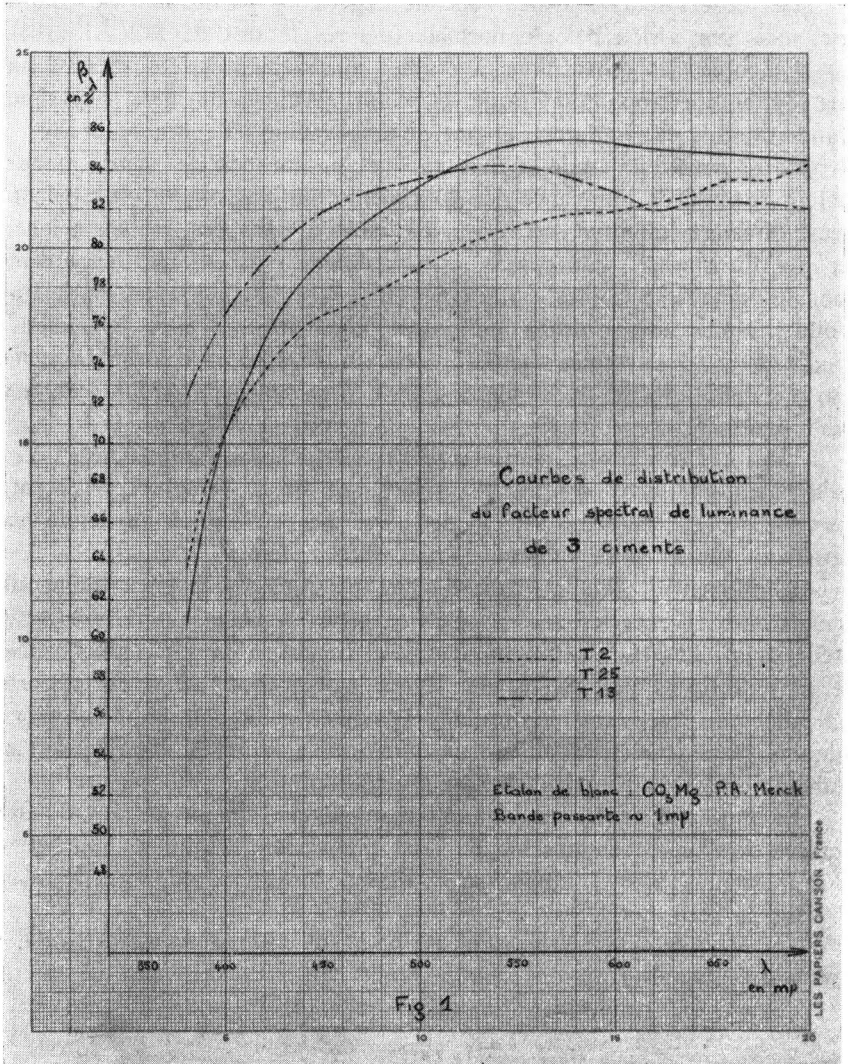
$\sigma$  est l'écart-type,  $N'$  le nombre d'observateurs conservés et  $t_{N' - 1}$  est un

(\*) Le score est la somme des points obtenus par un échantillon.

(\*\*) Tout observateur dont les réponses conduisaient à un score différant de plus de  $2 \sigma$  de la moyenne était écarté.

coefficient qui dépend de la valeur de  $N'$  et du degré de probabilité choisi (les valeurs de  $t$  ont été tabulées par *Student-Fisher* (9)).

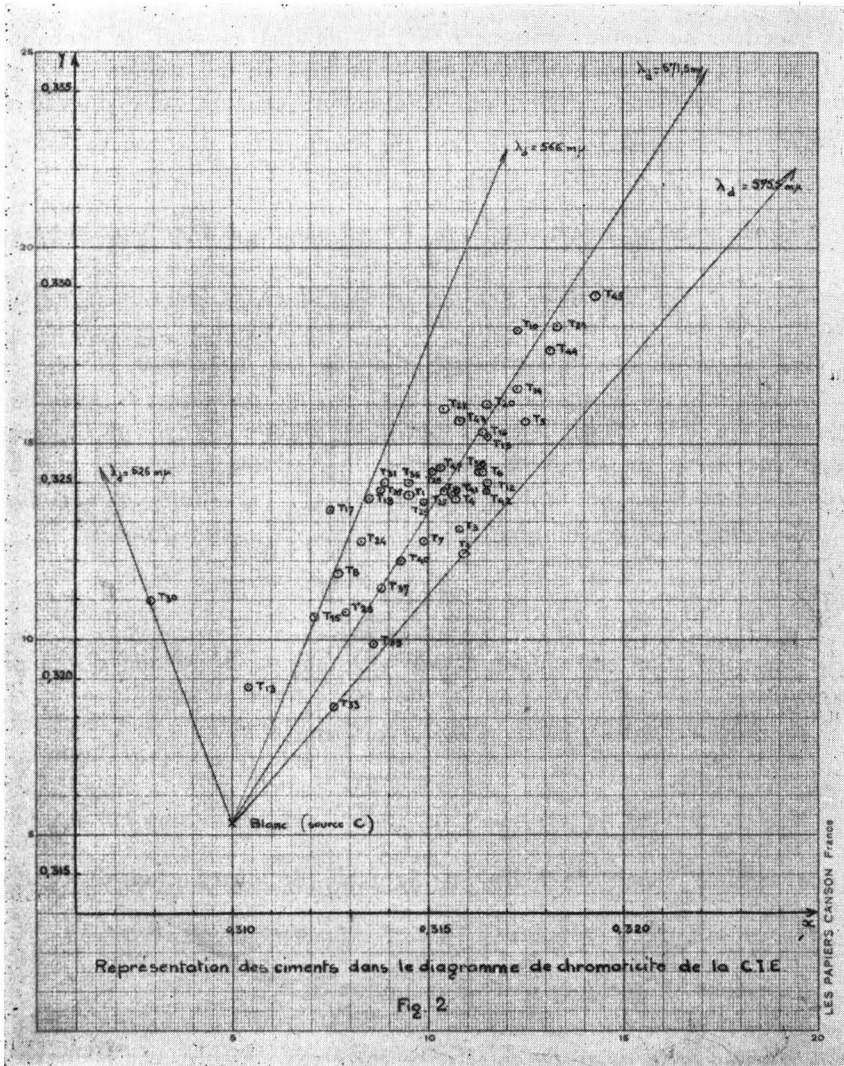
Remarquons que ce calcul ne peut être fait qu'en supposant que les



observateurs représentent bien un échantillonnage moyen d'une infinité d'observateurs normaux, et que  $\varepsilon$  est, seulement dans cette hypothèse, l'erreur *maximale*.

On constate sur le tableau 3 que la précision avec laquelle est connue

la blancheur visuelle est faible, en particulier pour les 2ème et 4ème séries. Ceci provient de la grande difficulté de comparaison des échantillons



ayant des teintes dominantes différentes (verte, jaune, rose) et à l'intervention, dans ce cas, du goût personnel de l'observateur. L'influence non négligeable de ce facteur est mise en évidence sur le tableau 4, où sont comparées les variances expérimentales  $\sigma^2_i$  et  $\sigma^2_T$  obtenues respectivement:

- pour un observateur donné répétant 6 fois les observations;
- pour 23 observateurs différents.

On constate en effet que pour 6 ciments sur 10, le rapport  $\frac{\sigma^2_r}{\sigma^2_i}$  est très supérieur au rapport critique  $r = 3,99$  indiqué au seuil de probabilité de 0,01 dans la table de *SNEDECOR* (voir (9)), ce qui signifie que, pour ces ciments au moins, le goût des observateurs est une cause de variance supplémentaire.

## 2.2 - Application et comparaison de 15 formules de blancheur existantes

A partir des résultats spectrophotométriques et colorimétriques, la blancheur  $W$  de tous les ciments étudiés visuellement a été calculée par 15 formules dont les références sont données sur le tableau 1.

Les valeurs de  $W$  ainsi obtenues ont alors été comparées à celles de  $V$  (pour chaque série (\*)) par le calcul statistique à l'aide de deux méthodes:  
 — la *coefficient de corrélation linéaire de Pearson*  $\rho$  dont la signification a été examinée par le test de *Student*.

Rappelons brièvement que:

$$\rho = \frac{\text{cov}(V, W)}{\sigma_V \cdot \sigma_W}$$

et que la corrélation entre  $V$  et  $W$  sera d'autant meilleure que  $\rho$  sera plus voisin de 1.

Le test de *Student*, lui, consiste à comparer  $t'$

$$t' = \frac{\rho \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-\rho^2}}$$

à une certaine valeur de  $t$  lue sur la table de distribution de *Student* déjà citée.

— la *variance résiduelle*  $\sigma^2_{\text{res}}$  *normalisée*

Rappelons en quelques mots la définition de  $\sigma^2_{\text{res}}$ .

Lorsqu'il existe entre deux variables, ici  $V$  et  $W$ , une relation linéaire, on peut mesurer le degré de corrélation entre ces variables par la moyenne des carrés des distances, mesurées parallèlement à l'axe de  $W$  (voir figure ci-contre) des points expérimentaux, à la droite de regression, et cette

(\*) Le calcul ne peut être fait pour l'ensemble des ciments étudiés, car les blancheurs  $V$  ne sont que des valeurs relatives valables seulement pour la série d'où elles sont tirées.



quantité  $\sigma^2_{w\ res}$  a été appelée, par analogie avec la variance expérimentale, variance résiduelle de corrélation.

La corrélation sera d'autant plus forte que  $\sigma^2_{w\ res}$  est plus faible, à la limite,  $\sigma^2_{w\ res} = 0$ , mais pour pouvoir comparer les diverses formules entre elles, il faut tenir compte de l'échelle des  $W$ . Pour ce faire, on peut normaliser  $\sigma^2_{w\ res}$  en la divisant par:

$$L^2 = (V_{Max} - V_{Min})^2 a^2$$

( $a$  est la pente de la droite de régression correspondante).

L'ensemble des résultats obtenus pour les quatre séries est donné sur le tableau 1.

Nous n'entrerons pas dans les détails de la comparaison de ces formules entre elles: ce n'est pas le sujet de cet exposé. Nous ferons seulement remarquer que les formules de STEPHANSEN, HARRISON, BERGER et TAUBE, toutes linéaires en  $B$ ,  $G$ ,  $R$  sont:

— très satisfaisantes pour les 1ère et 3ème séries, c'est-à-dire quand la longueur d'onde dominante des ciments étudiés varie respectivement de 566 à 572  $m\mu$  et 571 à 576  $m\mu$

— inacceptables pour les 2ème et 4ème séries, c'est-à-dire dans le cas général ( $526 < \lambda_d < 576\ m\mu$ ).

Ces constatations serviront à l'établissement de la nouvelle formule.

### 3 - Etablissement de la formule.

Le principe de la méthode utilisée est le suivant: après adoption d'une forme initiale simple, on se sert du calcul statistique pour déduire la formule de blancheur cherchée des résultats expérimentaux obtenus pour les 4 séries de ciments étudiés. L'application de cette formule à ces échantillons doit donner des valeurs de corrélation maximale avec les résultats visuels.

#### 3.1 - Choix de la formule initiale

Les observations précédentes nous ont amené à chercher une transformation linéaire simple d'une formule du type:

$$(1) \quad W = a\beta_1 + b\beta_2 + c\beta_3 (*)$$

qui, par l'introduction indirecte de  $\lambda_d$  dans ses coefficients, permettrait d'étendre, au moins légèrement, son domaine d'application.

Le remplacement de  $B$ ,  $G$ ,  $R$  par trois facteurs de luminance spectraux  $\beta_1$ ,

(\*) Remarquons que  $a$ ,  $b$  et  $c$  ne sont pas indépendants.

En effet si  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 100\%$  il est nécessaire que  $W = 100\%$  et en conséquence  $a$ ,  $b$  et  $c$  doivent être tels que  $a + b + c = 1$ .

$\beta_2, \beta_3$  est possible, car l'expérience a montré que les courbes spectrophotométriques des ciments blancs ne présentent pas de changements brusques de pente et il offre en outre trois avantages:

- la possibilité de choisir les longueurs d'onde,
- la bonne précision avec laquelle on peut mesurer  $\beta_1, \beta_2$  et  $\beta_3$ ,
- la facilité de standardisation.

### Choix de $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ .

Les longueurs d'onde des maximums des filtres tristimuli  $B, G, R$  étant respectivement de 450, 560 et 600  $m\mu$ , nous les avons d'abord choisis pour calculer  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  mais nous avons trouvé par approximations successives que l'on obtenait de meilleurs résultats en prenant:

$$\beta_1 = \beta_{430} m\mu$$

$$\beta_2 = \beta_{560} m\mu$$

$$\beta_3 = \beta_{660} m\mu$$

Ces valeurs ont été adoptées en définitive et sont celles utilisées tout au long de l'exposé qui va suivre (\*).

### Introduction de la Longueur d'onde dominante dans la formule (1).

Ayant observé que dans le domaine qui nous intéresse (de 526 à 576  $m\mu$ ) la valeur algébrique de la différence ( $\beta_3 - \beta_2$ ) est liée à la longueur d'onde dominante (voir tableau 5), nous avons eu l'idée d'utiliser cette propriété pour introduire  $\lambda_d$  dans l'équation (1), mais il restait à déterminer la forme nouvelle de cette équation (1).

Ce dernier problème a pu être résolu en généralisant les notions de ton moyen et de facteur de coloration, définis par Monsieur JACQUEMART (7), et en les utilisant pour interpréter les résultats des mesures visuelles des 1ère et 3ème séries.

Ces séries étaient particulièrement intéressantes à étudier car elles se composent respectivement de ciments pour lesquels dans un cas (1ère série)  $\beta_2 - \beta_3 > 0$ , dans l'autre (3ème série)  $\beta_2 - \beta_3 < 0$ .

Pour chaque ciment de ces séries les trois quantités suivantes ont été

(\*) Indiquons ici que tous les calculs de  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  ont été faits en supposant que l'on ait affaire à des filtres de bande passante 20  $m\mu$ .

calculées:

— le ton moyen:  $TM = \frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3}{3}$

— deux facteurs de coloration:

$$FC_{21} = \beta_2 - \beta_1$$

$$FC_{31} = \beta_3 - \beta_1$$

et les ciments ont été ensuite représentés par des segments de droite dans un système de coordonnées rectangulaires ( $TM$ ,  $FC$ ). A côté de chaque ciment, a été indiqué en outre, dans un cartouche, son rang (par ordre décroissant de blancheur visuelle).

L'examen du diagramme obtenu (voir figure 3) montre que:

1) pour les deux séries, la blancheur visuelle:

— croît avec le ton moyen (comparer par exemple, dans la 1ère série,  $T$  36 et  $T$  28, dans la 3ème série,  $T$  37 et  $T$  3),

— décroît avec la moyenne des deux facteurs de coloration (comparer, par exemple, dans la 1ère série,  $T$  8 et  $T$  36, dans la 3ème série,  $T$  33 et  $T$  37).

2) pour la 1ère série, c'est-à-dire quand  $\beta_2 - \beta_3 > 0$ , la blancheur visuelle décroît avec la longueur du segment représentatif (comparer par exemple  $T$  18 et  $T$  29).

3) pour la 3ème série, c'est-à-dire quand  $\beta_2 - \beta_3 < 0$ , l'influence de la longueur du segment est très réduite (comparer par exemple  $T$  2 et  $T$  6).

Pour tenir compte de ces observations, tout en conservant la linéarité en  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  nous avons alors mis l'équation de la blancheur sous la forme suivante:

$$(2) \quad W = TM - k \frac{FC_{21} + FC_{31}}{2} - q (FC_{21} - FC_{31})$$

|                               |   |  |
|-------------------------------|---|--|
| ↑                             | ↑   | ↑  |
| croît avec<br>le ton<br>moyen | décroît avec<br>la moyenne<br>des facteurs<br>de coloration | est lié à la dif-<br>férence des<br>facteurs de<br>coloration. |

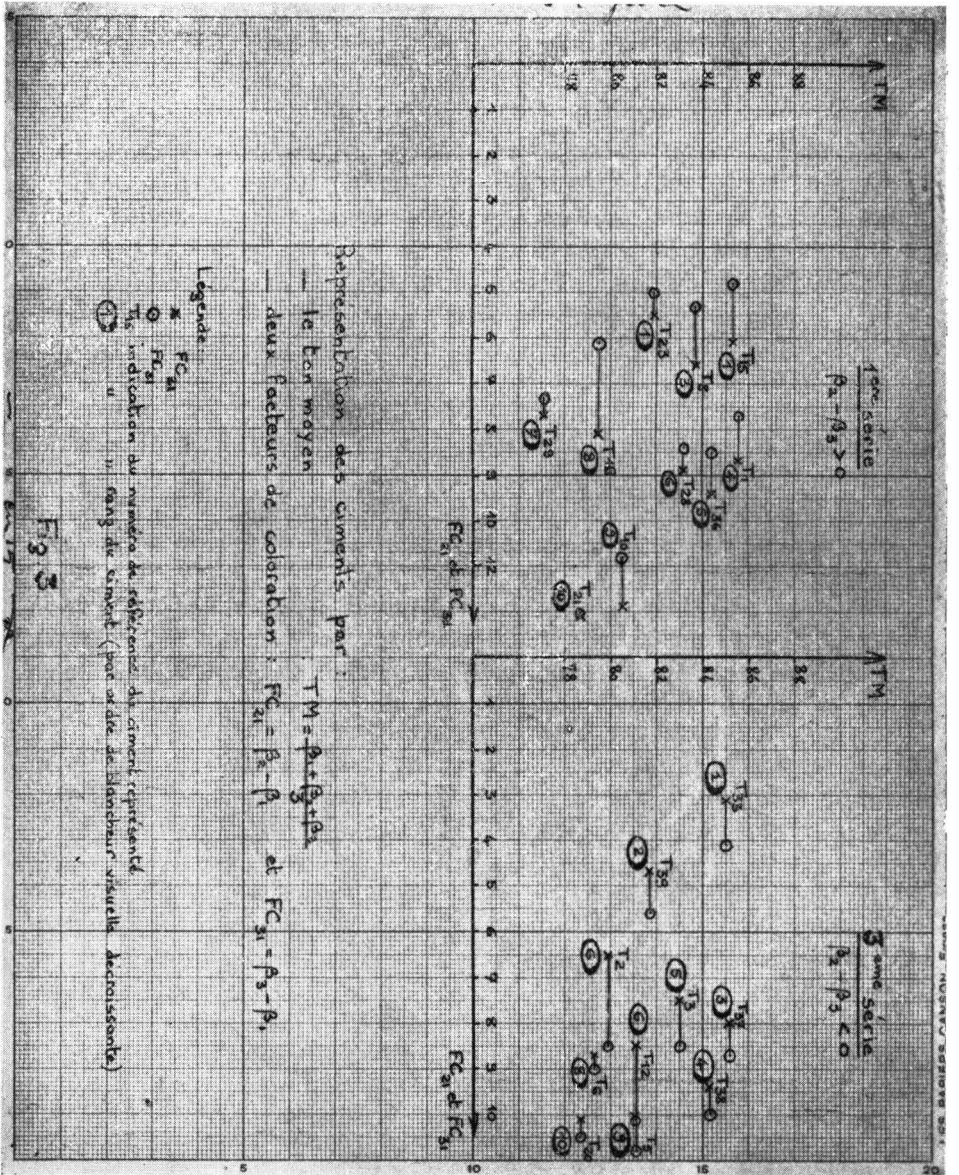
Dans cette équation:

$$q = m \text{ si } FC_{21} - FC_{31} > 0$$

$$q = n \text{ si } FC_{21} - FC_{31} < 0$$

et  $k$  et  $m$  sont des constantes positives et  $n$  une constante très petite de signe quelconque.

Avant de poursuivre, il faut remarquer que le coefficient de  $TM$  ayant été pris égal à 1, on tient compte a priori, de la condition:  $W = 100\%$  si  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 100\%$ .



Dans ces conditions, les coefficients  $a$ ,  $b$  et  $c$  de l'équation (1) sont indépendants, et l'on n'a pas, malgré les apparences, réduit le nombre des paramètres en passant d'une équation à l'autre.

Après simplification, l'équation (2) s'écrit en fonction de  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ :

$$(3) \quad W = \left(\frac{1}{3} + k\right) \beta_1 + \left(\frac{1}{3} - \frac{k}{2}\right) (\beta_2 + \beta_3) - q(\beta_2 - \beta_3)$$

où

$$q = m \text{ si } \beta_2 - \beta_3 > 0$$

$$q = n \text{ si } \beta_2 - \beta_3 < 0$$

Cette façon d'introduire la longueur d'onde dominante dans la formule (1), par le terme  $\beta_2 - \beta_3$ , offre des avantages certains, car elle est très simple et ne nécessite pas la connaissance de cette dernière, mais elle présente un inconvénient théorique. Elle fait apparaître en effet une discontinuité dans la formule pour  $\beta_2 - \beta_3 = 0$ . Cette discontinuité, sans conséquence grave dans la pratique, car elle a lieu au voisinage de zéro, ne pourrait malheureusement être évitée qu'au prix d'une complication importante de la formule (3), complication que nous avons voulu éviter à tout prix.

### 3.2 - Détermination des coefficients numériques

Dans les 1ère et 3ème séries, le signe de  $(\beta_2 - \beta_3)$  étant le même pour tous les ciments la formule (3) se simplifie, et peut se mettre sous la forme initiale (1) linéaire en  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ .

$$(1) \quad W = a\beta_1 + b\beta_2 + c\beta_3$$

Sous cette forme, on peut déterminer à partir des résultats expérimentaux  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  et  $V$ , les valeurs  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$ ,  $a_3$ ,  $b_3$ ,  $c_3$  des coefficients  $a$ ,  $b$ ,  $c$  (\*) qui donneraient respectivement pour la 1ère et la 3ème série, une formule de blancheur  $W$  telle que les valeurs calculées  $W$  présentent alors une corrélation  $\sigma^2_{w \text{ res}}$  (\*) qui donne des calculs plus simples que le test du coefficient de corrélation linéaire de Pearson.

On a observé en effet que  $\sigma^2_{w \text{ res}}$  peut être mise sous la forme d'une équation homogène du 2nd degré en  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , et les valeurs de  $a$ ,  $b$ ,  $c$  qui rendent  $\sigma^2_{w \text{ res}}$  minimale sont en conséquence faciles à calculer.

$$(4) \quad \sigma^2_{w \text{ res}} = \sigma^2_W - \frac{\text{cov}^2(V, W)}{\sigma^2_V}$$

et  $\sigma_W$  et  $\text{cov}(V, W)$  peuvent être calculées uniquement en fonction de  $V$ ,

(\*) Par raison de symétrie, les trois coefficients non indépendants  $a$ ,  $b$  et  $c$  ont été conservés dans une bonne partie des calculs.

$a, b, c, \beta_1, \beta_2$  et  $\beta_3$  en tenant compte de l'équation (1), et des définitions bien connues de la variance et de la covariance.

On trouve:

$$\sigma^2_{W \text{ rés.}} = A_1 a^2 + A_2 b^2 + A_3 c^2 + 2B_{12} ab + 2B_{23} bc + 2B_{13} ac$$

$$\text{cov}(VW) = C_1 a + C_2 b + C_3 c$$

en posant:

$$A_1 = \sigma^2 \beta_1 \text{ et analogues}$$

$$C_1 = \text{cov}(V\beta_1) \text{ et analogues}$$

$$B_1 = \text{cov}(\beta_1 \beta_2) \text{ et analogues}$$

d'où:

(5)

$$\sigma^2_{W \text{ rés.}} = \left( A_1 - \frac{C_1^2}{\sigma^2_v} \right) a^2 + \left( A_2 - \frac{C_2^2}{\sigma^2_v} \right) b^2 + \left( A_3 - \frac{C_3^2}{\sigma^2_v} \right) c^2 + 2 \left( B_{12} - \frac{C_1 C_2}{\sigma^2_v} \right) ab$$

$$+ 2 \left( B_{23} - \frac{C_2 C_3}{\sigma^2_v} \right) bc + 2 \left( B_{13} - \frac{C_1 C_3}{\sigma^2_v} \right) ac$$

mais l'équation (5) peut s'exprimer en fonction seulement des deux paramètres indépendants  $b$  et  $c$ , en tenant compte de la relation qui lie  $a, b$  et  $c$ :

$$(6) \quad a + b + c = 1$$

Il vient alors:

$$(7) \quad \sigma^2_{W \text{ rés.}} = \alpha_1 b^2 + \alpha_2 c^2 + 2 \gamma bc + 2 \delta_1 b + 2 \delta_2 c + K_1$$

en posant:

$$\alpha_1 = A_1 + A_2 - 2 B_{12} - \frac{(C_2 - C_1)^2}{\sigma^2_v}$$

$$\alpha_2 = A_1 + A_3 - 2 B_{13} - \frac{(C_3 - C_1)^2}{\sigma^2_v}$$

$$\gamma = A_1 - B_{12} - B_{13} + B_{23} - \frac{(C_2 - C_1)(C_3 - C_1)}{\sigma^2_v}$$

$$\delta_1 = B_{12} - A_1 - \frac{C_1(C_2 - C_1)}{\sigma^2_v}$$

$$\delta_2 = B_{13} - A_1 - \frac{C_1(C_3 - C_1)}{\sigma^2_v}$$

$$K_1 = A_1 - \frac{C_1^2}{\sigma^2_v}$$

et  $\sigma^2_{W \text{ rés.}}$  étant une fonction de deux paramètres indépendants  $b$  et  $c$  sera minimale quand ses dérivées partielles respectivement par rapport à  $b$  et à  $c$  seront nulles. Les valeurs optimales de  $b$  et  $c$  seront en conséquence définies par les conditions.

$$(8) \quad \frac{\partial \sigma^2_{W \text{ rés.}}}{\partial b} = \alpha_1 b + \gamma c + \delta_1 = 0$$

$$\frac{\partial \sigma^2_{W \text{ rés.}}}{\partial c} = \gamma b + \alpha_2 c + \delta_2 = 0$$

d'où

$$(9) \quad b = \frac{\gamma \delta_2 - \alpha_2 \delta_1}{\alpha_1 \alpha_2 - \gamma^2}$$

$$c = \frac{\gamma \delta_1 - \alpha_1 \delta_2}{\alpha_1 \alpha_2 - \gamma^2}$$

et

$$a = 1 - b - c$$

Les valeurs optimales de  $a$ ,  $b$  et  $c$  ont été calculées par les équations (9) respectivement pour la 1ère et la 3ème série, et les résultats suivants ont été obtenus:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = 2,107 \\ b_1 = 3,414 \\ c_1 = 2,308 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} a_3 = 1,253 \\ b_3 = -0,175 \\ c_3 = -0,138 \end{array} \right.$$

On observe que les valeurs optimales de  $a$ ,  $b$ ,  $c$  obtenues pour les 2 séries sont très différentes. Cette constatation montre clairement pourquoi une formule simple unique, linéaire en  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ , telle que (1) ne peut donner de bons résultats dans le cas général.

Pour calculer ensuite  $l$ ,  $m$  et  $n$  en fonction de  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$ ,  $a_3$ ,  $b_3$  et  $c_3$ , il suffit d'identifier les équations (1) et (3) en se souvenant que  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$  correspond au cas où  $\beta_2 - \beta_3 > 0$  et  $a_3$ ,  $b_3$ ,  $c_3$  au cas où  $\beta_2 - \beta_3 < 0$ .

Moyennant une approximation impossible à éviter, due au fait que dans l'équation (3) le coefficient de  $\beta_1$  est indépendant du signe de  $\beta_2 - \beta_3$  tandis que les valeurs expérimentales  $a_1$  et  $a_3$  sont différentes, on obtient alors:

$$(10) \quad l = \frac{a_1 + a_3}{2} - \frac{1}{3}$$

$$m = \frac{c_1 - b_1}{2} \cdot \frac{a_1 + a_3}{2 a_1}$$

$$n = \frac{c_3 - b_3}{2} \cdot \frac{a_1 + a_3}{2 a_3}$$

Après calcul on trouve:

$$l = 1,35$$

$$m = 2,28$$

$$n = -0,02$$

et l'équation (3) devient:

$$(11) \quad \boxed{\begin{array}{l} W = 1,68 \beta_1 - 0,34 (\beta_2 + \beta_3) - q (\beta_2 - \beta_3) \\ q = 2,28 \text{ si } \beta_2 - \beta_3 > 0 \\ \text{où } q = -0,02 \text{ si } \beta_2 - \beta_3 < 0 \end{array}}$$

## 4 - Résultats.

La formule qui vient d'être établie à partir des séries 1 et 3 a été testée sur les 4 séries par les mêmes méthodes que les autres formules étudiées et les résultats obtenus sont donnés sur le tableau 6.

### 4.1 - Comparaison avec les 15 formules existantes précédemment essayées.

On constate sur la figure 4 que la formule (11) présente un coefficient de corrélation linéaire supérieur à ceux obtenus avec toutes les autres formules essayées pour les 1ère, 3ème et 4ème séries, légèrement inférieur à celui obtenu pour la 2ème série avec la formule de JUDD citée par SELLING, mais cette dernière donne par contre de très mauvais résultats pour la 4ème série.

Ces résultats étant confirmés par le test de la variance résiduelle normalisée (voir figure 5), on peut en conclure que *la formule (11) est plus satisfaisante pour les échantillons étudiés que toutes les formules existantes essayées.*

### 4.2 - Validité de la formule établie.

Rappelons qu'il ne s'agit pas ici de validité théorique, puisque, intrinsèquement, toute formule de blancheur est une approximation. Nous allons seulement regarder si, dans le domaine considéré, la solution approchée offerte par la formule (11) est en accord suffisant avec les jugements visuels.

On constate sur le tableau 6 que la formule (11) ne fournit pas toujours un classement rigoureusement identique au classement visuel (\*), mais la précision avec laquelle est connue la blancheur visuelle est faible, en particulier pour les 2ème et 4ème séries (voir tableau 3).

Les observateurs individuels ne classeraient pas non plus les ciments dans le même ordre (voir par exemple le tableau 4).

Le classement visuel n'est donc qu'une moyenne et la formule doit seulement être statistiquement en corrélation suffisante avec ce classement.

Or on constate sur le tableau 6 que la blancheur calculée par la formule (11):

1) présente avec la blancheur visuelle une corrélation significative à 99% pour les 4 séries.

2) donne une variance résiduelle faible pour les 4 séries.

(\*) On remarquera sur le tableau 7 que la formule de SELLING ne permet pas d'atteindre, comme on devait s'y attendre étant donné les valeurs de  $\rho$  obtenues, une meilleure concordance avec le classement visuel.



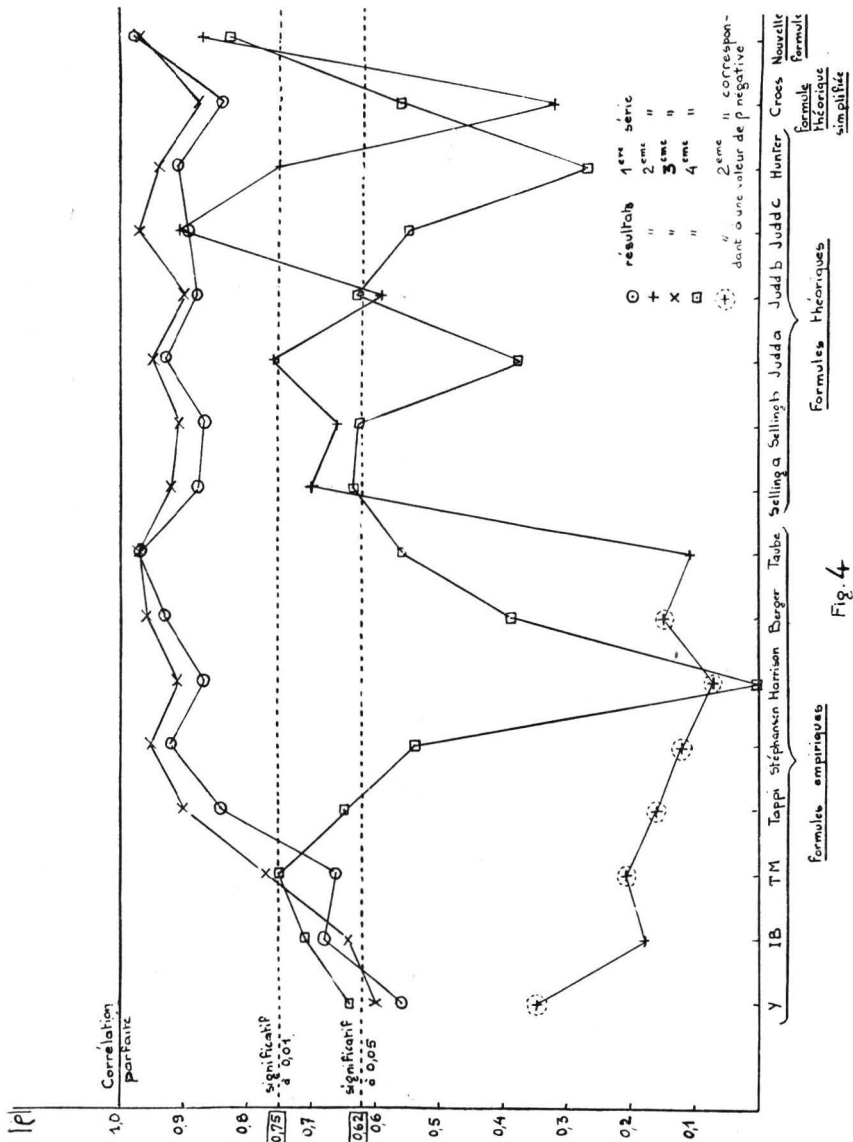


Fig. 4



En conséquence, au sens où nous l'avons entendu au début du paragraphe, on peut conclure que la formule (11) est valable dans le domaine étudié c'est-à-dire pour:

$$\begin{aligned} &\beta \text{ élevé } (< 80 \% \text{ environ}) \\ &556 \text{ m}\mu < \lambda_d < 576 \text{ m}\mu \\ &p \text{ faible } (< 10 \% \text{ environ}) \end{aligned}$$

On a exclu le cas du ciment T 30 très teinté de vert car l'expérience a montré qu'il est nettement surestimé par la formule (11), comme il l'était d'ailleurs par les formules de SELLING.

Exprimées en fonction de  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  les conditions d'emploi de la formule (11) sont les suivantes:

$$\begin{aligned} &\frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3}{3} \text{ élevé } (> 80 \% \text{ environ}) \\ &\beta_1 < \beta_2 \text{ et } \beta_3 \\ &|\beta_2 - \beta_3| \leq 2\% \end{aligned}$$

## 5 - Conclusion.

Au cours de la présente étude, une méthode nouvelle d'établissement d'une formule de blancheur a été mise au point. Elle permet de se rattacher directement à une étude visuelle simple et de résoudre tout problème concret de mesure de la blancheur se posant dans un domaine quelconque de teinte autour du point blanc.

Appliquée aux ciments, cette méthode a permis d'établir une formule tout à fait apte à permettre le classement d'échantillons suivant leur qualité de blancheur.

Elle présente les avantages pratiques suivants:

- une grande simplicité
- un domaine d'utilisation plus étendu que celui des formules simples proposées jusqu'ici.
- un accord avec les jugements visuels aussi bon et même légèrement meilleur, dans son domaine d'utilisation, que celui obtenu avec les formules les plus complexes.
- une grande facilité de standardisation puisque la mesure de facteurs de luminance spectraux ne dépend pas de la source et de la cellule utilisée.

Mais du point de vue théorique, l'intérêt de la formule (11) tient à son mode d'établissement. Elle repose en effet sur un maximum de corrélation avec la moyenne des jugements visuels.

## BIBLIOGRAPHIE

- (1) ALLEN E., J.O.S.A. 1959 49 1227-1228.
- (2) BERGER A., Die Farbe 8 1959 Nr 4/6 187-202.
- (3) CROES A. W., J.O.S.A. 1959 49 830-831.
- (4) FRIELE L. F. C., Die Farbe 8 1959 Nr 4/6 171-186.
- (5) HUNTER R. S., J.O.S.A. 1958 Vol. 48 Nr. 9 597-605.
- (6) HUNTER R. S., J.O.S.A. 1960 50 44-48
- (7) JACQUEMART, 4<sup>e</sup> Journées Internationales de la Couleur Section 1 Rouen 1960.
- (8) JUDD D. B., « Colorimetry » 1949 NBS Circular 479.
- (9) MOTHES J., « Techniques modernes de contrôle des fabrications » DUNOD 1952.
- (10) POLACK, « Examen de la vision des couleurs » GIRARD, BARRERE et THOMAS Paris 1953.
- (11) SELLING H. J. et FRIELE L. F. C., Appl. Sci. Res. 1950 B1 453-476.
- (12) SEVE R., Bulletin de l'ATIP N. 531-338.
- (13) SUGIYAMA et FUKUDA T., J. Applied Physics Japon 1960 29 7 480-486.
- (14) TAPPI (Méthode) ASTM 1950 D 985 50.

**TABEAU 1**  
**COMPARAISON EXPERIMENTALE DE 15 FORMULES EXISTANTES**

| Formule utilisée pour calculer W          | Référence        | Coefficient de corrélation linéaire $\rho$ entre la blancheur visuelle relative V et la blancheur calculée W |                            |                            |                            | Variance résiduelle normalisée correspondante $\sigma^2_{w_{res}}$ normalisée |                     |                     |                     |
|---|------------------|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---|---------------------|---------------------|---------------------|
|   |                  | 1° série de ciments  | 2° série de ciments        | 3° série de ciments        | 4° série de ciments        | 1° série de ciments   | 2° série de ciments | 3° série de ciments | 4° série de ciments |
| Facteur de luminance                      | (5)<br>(11) (13) | 0,56<br>non significatif   | — 0,35<br>non significatif | 0,60<br>non significatif   | 0,64<br>significatif à 95% | 0,26  | 0,6                 | 0,16                | 0,17                |
| Indice de blancheur                       | (*)              | 0,68<br>significatif à 95%   | 0,18<br>non significatif   | 0,64<br>significatif à 95% | 0,71<br>significatif à 95% | 0,15  | 2,7                 | 0,13                | 0,11                |
| Ton moyen                                 | (7)              | 0,66<br>significatif à 95%   | — 0,21<br>non significatif | 0,77<br>significatif à 99% | 0,75<br>significatif à 95% | 0,15  | 1,8                 | 0,065               | 0,08                |
| Méthode TAPPI                             | (8)<br>(12) (14) | 0,84<br>significatif à 99%   | — 0,16<br>non significatif | 0,90<br>significatif à 99% | 0,65<br>significatif à 95% | 0,05  | 3,3                 | 0,02                | 0,15                |
| STEPHANSEN                                | (4) (12)         | 0,92<br>significatif à 99%   | — 0,12<br>non significatif | 0,95<br>significatif à 99% | 0,54<br>non significatif   | 0,02  | 6,8                 | 0,01                | 0,27                |
| HARRISON                                  | (4) (12)         | 0,87<br>significatif à 99%   | — 0,07<br>non significatif | 0,91<br>significatif à 99% | 0<br>aucune corrélation    | 0,04  | 18,0                | 0,02                | $\infty$            |
| BERGER                                    | (2) (12)         | 0,93<br>significatif à 99%   | — 0,15<br>non significatif | 0,96<br>significatif à 99% | 0,39<br>non significatif   | 0,02  | 3,4                 | 0,01                | 0,64                |
| TAUBE                                     | (6) (12)         | 0,96<br>significatif à 99%   | 0,11<br>non significatif   | 0,97<br>significatif à 99% | 0,56<br>non significatif   | 0,01  | 7,2                 | 0,006               | 0,25                |
| SELLING<br>formule 1 (**)                 | (11)             | 0,87<br>significatif à 99%   | 0,66<br>significatif à 95% | 0,91<br>significatif à 99% | 0,66<br>significatif à 95% | 0,04  | 0,09                | 0,02                | 0,16                |
| SELLING<br>formule 2 (**)<br>(simplifiée) | (11)             | 0,88<br>significatif à 99%   | 0,70<br>significatif à 95% | 0,92<br>significatif à 99% | 0,67<br>significatif à 95% | 0,03  | 0,09                | 0,02                | 0,15                |
| JUDD citée<br>par SELLING                 | (11)             | 0,93<br>significatif à 99%   | 0,76<br>significatif à 99% | 0,95<br>significatif à 99% | 0,38<br>non significatif   | 0,02  | 0,06                | 0,01                | 0,68                |
| JUDD modifiée<br>par SELLING              | (11)             | 0,88<br>significatif à 99%   | 0,59<br>non significatif   | 0,90<br>significatif à 99% | 0,63<br>significatif à 95% | 0,04  | 0,15                | 0,02                | 0,17                |
| JUDD citée<br>par SELLING<br>(**)         | (11)             | 0,89<br>significatif à 99%   | 0,91<br>significatif à 99% | 0,97<br>significatif à 99% | 0,55<br>non significatif   | 0,03  | 0,02                | 0,006               | 0,26                |
| HUNTER                                    | (5)              | 0,91<br>significatif à 99%   | 0,75<br>significatif à 99% | 0,94<br>significatif à 99% | 0,27<br>non significatif   | 0,03  | 0,06                | 0,01                | 1,45                |
| CROES                                     | (3)              | 0,84<br>significatif à 99%   | 0,32<br>non significatif   | 0,88<br>significatif à 99% | 0,56<br>non significatif   | 0,05  | 0,7                 | 0,03                | 0,25                |

(\*) Cette méthode mise au point au Laboratoire LAFARGE en 1933, consiste à prendre la moyenne de 6 facteurs de luminance mesurés respectivement dans le violet, le bleu, le vert, le jaune, l'orangé et le rouge.

(\*\*) Dans ces trois formules, les coefficients de  $(\Delta S)^2$  ont été multipliés par 3,08 pour tenir compte d'une erreur matérielle dans la référence citée, erreur qui a été corrigée plus tard par FRIELE (4).

**TABEAU 2**  
**CARACTERISTIQUES COLORIMETRIQUES DES CIMENTS ETUDIES VISUELLEMENT**

| 1ère série |             |      |      |
|------------|-------------|------|------|
| Ciment     | $\lambda d$ | p    | Y    |
| 15         | 566         | 3,6  | 87,2 |
| 23         | 569,5       | 3,85 | 83,4 |
| 8          | 566,5       | 4,4  | 85,7 |
| 1          | 569,5       | 5,9  | 87,9 |
| 36         | 569         | 6,1  | 87,0 |
| 28         | 570         | 6,5  | 85,5 |
| 29         | 571         | 5,9  | 79,2 |
| 18         | 566,5       | 5,7  | 82,0 |
| 10         | 570,5       | 8,9  | 83,7 |
| 21         | 572         | 9,2  | 81,7 |

| 3ème série |             |     |      |
|------------|-------------|-----|------|
| Ciment     | $\lambda d$ | p   | Y    |
| 33         | 575,5       | 2,4 | 85,6 |
| 39         | 574,5       | 3,6 | 82,8 |
| 37         | 571,5       | 4,4 | 87,0 |
| 38         | 573         | 6,7 | 86,6 |
| 3          | 574         | 5,8 | 84,6 |
| 12         | 573,5       | 7,0 | 83,0 |
| 2          | 575,5       | 5,4 | 81,0 |
| 6          | 573         | 6,8 | 81,6 |
| 5          | 573,5       | 7,7 | 83,6 |
| 20         | 571         | 7,7 | 81,0 |

| 2ème série |             |      |      |
|------------|-------------|------|------|
| Ciment     | $\lambda d$ | p    | Y    |
| 39         | 574,5       | 3,6  | 82,8 |
| 23         | 569,5       | 3,85 | 83,4 |
| 13         | 556,5       | 2,1  | 83,6 |
| 9          | 572         | 6,3  | 85,5 |
| 36         | 569         | 6,1  | 87,0 |
| 28         | 570         | 6,5  | 85,5 |
| 3          | 574         | 5,8  | 84,6 |
| 41         | 572         | 6,4  | 84,1 |
| 25         | 571,5       | 6,3  | 84,8 |
| 30         | 526         | 8,2  | 84,2 |

| 4ème série |             |      |      |
|------------|-------------|------|------|
| Ciment     | $\lambda d$ | p    | Y    |
| 38         | 573         | 6,7  | 86,6 |
| 35         | 567,5       | 5,75 | 87,3 |
| 4          | 572,5       | 6,2  | 82,0 |
| 42         | 574         | 6,5  | 85,6 |
| 2          | 575,5       | 5,4  | 81,0 |
| 17         | 563,5       | 5,3  | 86,5 |
| 43         | 570         | 7,3  | 80,4 |
| 20         | 571         | 7,7  | 81,0 |
| 16         | 571,5       | 7,4  | 83,2 |
| 31         | 567,5       | 5,9  | 82,0 |

**TABLEAU 3**  
**BLANCHEURS VISUELLES RELATIVES DES CIMENTS ETUDIÉS**

| 1ère série |        |                     | 2ème série |        |                     |
|------------|--------|---------------------|------------|--------|---------------------|
| Ciment (*) | V (**) | $\varepsilon$ (***) | Ciment (*) | V (**) | $\varepsilon$ (***) |
| 15         | 25,3   | 0,6                 | 39         | 25,1   | 1,2                 |
| 23         | 25,2   | 1,2                 | 23         | 24,9   | 1,0                 |
| 8          | 23,4   | 0,7                 | 13         | 20,2   | 2,6                 |
| 1          | 20,4   | 1,3                 | 9          | 19,7   | 1,3                 |
| 36         | 18,9   | 0,8                 | 36         | 18,3   | 2,6                 |
| 28         | 17,0   | 0,6                 | 28         | 15,9   | 2,0                 |
| 29         | 15,8   | 1,1                 | 41         | 15,8   | 1,9                 |
| 18         | 13,4   | 0,8                 | 3          | 15,8   | 2,4                 |
| 10         | 11,0   | 0,6                 | 25         | 15,2   | 0,9                 |
| 21         | 9,5    | 0,4                 | 30         | 9,0    | 0                   |

| 3ème série |        |                     | 4ème série |        |                     |
|------------|--------|---------------------|------------|--------|---------------------|
| Ciment (*) | V (**) | $\varepsilon$ (***) | Ciment (*) | V (**) | $\varepsilon$ (***) |
| 33         | 27,0   | 0                   | 38         | 23,7   | 1,5                 |
| 39         | 25,0   | 0,3                 | 35         | 22,7   | 2,3                 |
| 37         | 22,3   | 0,9                 | 4          | 21,3   | 1,3                 |
| 38         | 19,2   | 1,1                 | 42         | 21,1   | 1,8                 |
| 3          | 17,9   | 1,0                 | 2          | 18,6   | 2,9                 |
| 12         | 16,0   | 1,2                 | 17         | 18,1   | 3,1                 |
| 2          | 15,9   | 2,0                 | 43         | 14,8   | 1,4                 |
| 6          | 14,7   | 1,4                 | 20         | 14,7   | 1,3                 |
| 5          | 12,2   | 0,7                 | 16         | 12,9   | 1,4                 |
| 20         | 9,8    | 0,6                 | 31         | 11,7   | 1,3                 |

(\*) Ceux-ci ont été classés par ordre décroissant de blancheur.

(\*\*) V la blancheur visuelle.

(\*\*\*)  $\varepsilon$  est l'erreur maximale à craindre au seuil de 0,01.

**TABLEAU 4**  
**Influence du facteur " Observateur " sur les résultats de comparaisons visuelles de blancheur**

| Ciments<br>(2ème série) | Blancheurs visuelles                   |   | Variances expérimentale                  |                                     | $r = \frac{\sigma^2_T}{\sigma^2_i}$ |
|-------------------------|--|---|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                         | Moyennes pour 23 observateurs<br>$V_T$ | Moyennes de 6 observations pour un observ.<br>$V_i$ | pour les 23 observateurs<br>$\sigma^2_T$ | pour un observateur<br>$\sigma^2_i$ |                                     |
| 39                      | 25,1                                   | 26,7  | 3,5                                      | 0,6                                 | 5,8                                 |
| 23                      | 24,9                                   | 23,2  | 2,8                                      | 0,1                                 | 28,0                                |
| 13                      | 20,2                                   | 24,5  | 18,1                                     | 2,6                                 | 7,0                                 |
| 9                       | 19,7                                   | 18,0  | 4,1                                      | 1,7                                 | 2,4                                 |
| 36                      | 18,3                                   | 16,5  | 17,9                                     | 2,3                                 | 7,8                                 |
| 28                      | 15,9                                   | 16,3  | 10,3                                     | 3,2                                 | 3,2                                 |
| 3                       | 15,8                                   | 11,5  | 14,9                                     | 0,6                                 | 24,6                                |
| 41                      | 15,8                                   | 18,3  | 9,6                                      | 3,9                                 | 2,5                                 |
| 25                      | 15,2                                   | 15,3  | 2,3                                      | 2,2                                 | 1                                   |
| 30                      | 9,0                                    | 9,0   | 0  | 0                                   |                                     |

**TABLEAU 5**

**Corrélation dans le domaine étudié entre la longueur d'onde dominante  
et la différence  $\beta_2 - \beta_3$**

| Ciments | $\lambda d$<br>en $m\mu$ | $\beta_2 - \beta_3$<br>en% |
|---------|--------------------------|----------------------------|
| 2       | 575,5                    | — 2,0                      |
| 33      | »                        | — 1,0                      |
| 39      | 574,5                    | — 0,9                      |
| 3       | 574                      | — 1,0                      |
| 42      | »                        | — 0,9                      |
| 5       | 573,5                    | — 0,7                      |
| 12      | »                        | — 1,6                      |
| 38      | 573                      | — 0,6                      |
| 6       | »                        | — 0,3                      |
| 46      | »                        | — 0,6                      |
| 11      | »                        | — 0,1                      |
| 45      | 572,5                    | — 0,4                      |
| 7       | »                        | — 0,2                      |
| 4       | »                        | — 0,4                      |
| 21      | 572,0                    | 0,1                        |
| 9       | »                        | — 0,3                      |
| 19      | »                        | 0                          |
| 14      | »                        | — 0,1                      |
| 41      | »                        | — 0,2                      |
| 44      | »                        | — 0,1                      |
| 16      | 571,5                    | 0,5                        |
| 25      | »                        | 0,6                        |
| 37      | »                        | — 0,7                      |
| 40      | »                        | — 0,2                      |
| 20      | 571                      | — 0,4                      |
| 29      | »                        | 0,4                        |
| 47      | 570,5                    | 0,8                        |
| 10      | »                        | 1,1                        |
| 43      | 570                      | 0,8                        |
| 28      | »                        | 0,5                        |
| 23      | 569,5                    | 0,5                        |
| 1       | »                        | 1,0                        |
| 22      | 569                      | 1,8                        |
| 36      | »                        | 0,9                        |
| 35      | 567,5                    | 1,9                        |
| 24      | »                        | 1,1                        |
| 31      | »                        | 2,1                        |
| 8       | 566,5                    | 1,3                        |
| 18      | »                        | 2,0                        |
| 15      | 566                      | 1,3                        |
| 17      | 563,5                    | 2,5                        |
| 13      | 556,5                    | 1,6                        |
| 30      | 526                      | 4,0                        |



**TABLEAU 6**

**Corrélation entre la blancheur visuelle et la blancheur calculée par la formule (11) :**

$$W = 1,68 \beta_1 - 0,34 (\beta_2 + \beta_3) - q (\beta_2 - \beta_3) \text{ où } q = \begin{cases} 2,28 & \text{si } \beta_2 - \beta_3 > 0 \\ -0,02 & \text{si } \beta_2 - \beta_3 < 0 \end{cases}$$

| 1ère série   |                     |                                    |
|--|---------------------|------------------------------------|
| Ciment   | Blancheur visuelle  | Blancheur cal. par la formule (11) |
| 15   | 25,3                | 75,0                               |
| 23   | 25,2                | 73,7                               |
| 8  | 23,4                | 72,7                               |
| 1  | 20,4                | 72,2                               |
| 36   | 18,9                | 70,3                               |
| 28   | 17,0                | 70,4                               |
| 29   | 15,8                | 66,1                               |
| 18   | 13,4                | 65,4                               |
| 10   | 11,0                | 62,7                               |
| 21   | 9,5                 | 62,1                               |
| $\rho$   | 0,97                |                                    |
| significativité de la corrél. d'après test de S.F. | significative à 99% |                                    |
| $\sigma^2$ résiduelle normalisée                   | 0,005               |                                    |

| 3ème série   |                     |                                    |
|--|---------------------|------------------------------------|
| Ciment   | Blancheur visuelle  | Blancheur cal. par la formule (11) |
| 33   | 27,0                | 80,1                               |
| 39   | 25,0                | 74,8                               |
| 37   | 22,3                | 73,9                               |
| 38   | 19,2                | 71,2                               |
| 3  | 17,9                | 72,2                               |
| 12   | 16,0                | 68,6                               |
| 2  | 15,9                | 69,9                               |
| 6  | 14,7                | 67,4                               |
| 5  | 12,2                | 67,0                               |
| 20   | 9,8                 | 64,8                               |
| $\rho$   | 0,97                |                                    |
| significativité de la corrél. d'après test de S.F. | significative à 99% |                                    |
| $\sigma^2$ résiduelle normalisée                   | 0,007               |                                    |

| 2ème série   |                     |                                    |
|--|---------------------|------------------------------------|
| Ciment   | Blancheur visuelle  | Blancheur cal. par la formule (11) |
| 39   | 25,1                | 74,8                               |
| 23   | 24,9                | 73,7                               |
| 13   | 20,2                | 74,7                               |
| 9  | 19,7                | 72,0                               |
| 36   | 18,3                | 70,3                               |
| 28   | 15,9                | 70,4                               |
| 3  | 15,8                | 70,1                               |
| 41   | 15,8                | 72,8                               |
| 25   | 15,2                | 69,9                               |
| 30   | 9,0                 | 67,2                               |
| $\rho$   | 0,87                |                                    |
| significativité de la corrél. d'après test de S.F. | significative à 99% |                                    |
| $\sigma^2$ résiduelle normalisée                   | 0,03                |                                    |

| 4ème série   |                     |                                    |
|--|---------------------|------------------------------------|
| Ciment   | Blancheur visuelle  | Blancheur cal. par la formule (11) |
| 38   | 23,7                | 71,2                               |
| 35   | 22,7                | 68,9                               |
| 4  | 21,3                | 69,3                               |
| 42   | 21,1                | 71,7                               |
| 2  | 18,6                | 69,8                               |
| 17   | 18,1                | 68,6                               |
| 43   | 14,8                | 63,3                               |
| 20   | 14,7                | 64,8                               |
| 16   | 12,9                | 66,6                               |
| 31   | 11,7                | 65,0                               |
| $\rho$   | 0,83                |                                    |
| significativité de la corrél. d'après test de S.F. | significative à 99% |                                    |
| $\sigma^2$ résiduelle normalisée                   | 0,05                |                                    |

**TABLEAU 7**

**Corrélation entre la blancheur visuelle et la blancheur calculée à partir de la formule 2 de SELLING :**

$$W = 100 - \sqrt{(\Delta Y)^2 + 3 \times 3,08 \times 10^6 (\Delta S)^2}$$

| 1ère série   |                      |                      |
|--|----------------------|----------------------|
| Ciment   | Blancheur visuelle V | Blancheur calculée W |
| 15   | 25,3                 | 85,4                 |
| 23   | 25,2                 | 81,9                 |
| 8  | 23,4                 | 83,5                 |
| 1  | 20,4                 | 83,8                 |
| 36   | 18,9                 | 82,7                 |
| 28   | 17,0                 | 81,4                 |
| 29   | 15,8                 | 76,6                 |
| 18   | 13,4                 | 79,0                 |
| 10   | 11,0                 | 76,9                 |
| 21   | 9,5                  | 74,9                 |
| $\rho$   | 0,88                 |                      |
| significativité de la corrélation d'après test de S.F. | significative à 99%  |                      |
| $\sigma^2$ résiduelle normalisée                       | 0,03                 |                      |

| 3ème série   |                      |                      |
|--|----------------------|----------------------|
| Ciment   | Blancheur visuelle V | Blancheur calculée W |
| 33   | 27,0                 | 84,9                 |
| 39   | 25,0                 | 81,5                 |
| 37   | 22,3                 | 83,8                 |
| 38   | 19,2                 | 81,8                 |
| 3  | 17,9                 | 81,2                 |
| 12   | 16,0                 | 78,9                 |
| 2  | 15,9                 | 78,3                 |
| 6  | 14,7                 | 77,8                 |
| 5  | 12,2                 | 78,2                 |
| 20   | 9,8                  | 76,3                 |
| $\rho$   | 0,92                 |                      |
| significativité de la corrélation d'après test de S.F. | significative à 99%  |                      |
| $\sigma^2$ résiduelle normalisée                       | 0,02                 |                      |

| 2ème série   |                      |                      |
|--|----------------------|----------------------|
| Ciment   | Blancheur visuelle V | Blancheur calculée W |
| 39   | 25,1                 | 81,5                 |
| 23   | 24,9                 | 81,9                 |
| 13   | 20,2                 | 82,0                 |
| 9  | 19,7                 | 81,5                 |
| 36   | 18,3                 | 82,7                 |
| 28   | 15,9                 | 81,4                 |
| 3  | 15,8                 | 81,2                 |
| 41   | 15,8                 | 80,3                 |
| 25   | 15,2                 | 81,0                 |
| 30   | 9,0                  | 79,5                 |
| $\rho$   | 0,70                 |                      |
| significativité de la corrélation d'après test de S.F. | significative à 95%  |                      |
| $\sigma^2$ résiduelle normalisée                       | 0,09                 |                      |

| 4ème série   |                      |                      |
|--|----------------------|----------------------|
| Ciment   | Blancheur visuelle V | Blancheur calculée W |
| 38   | 23,7                 | 81,8                 |
| 35   | 22,7                 | 83,2                 |
| 4  | 21,3                 | 78,7                 |
| 42   | 21,1                 | 81,1                 |
| 2  | 18,6                 | 78,3                 |
| 17   | 18,1                 | 82,7                 |
| 43   | 14,8                 | 76,2                 |
| 20   | 14,7                 | 76,3                 |
| 16   | 12,9                 | 78,5                 |
| 31   | 11,7                 | 78,7                 |
| $\rho$   | 0,67                 |                      |
| significativité de la corrélation d'après test de S.F. | significative à 95%  |                      |
| $\sigma^2$ résiduelle normalisée                       | 0,15                 |                      |

# MISURA DELLA NON COLORAZIONE DEL VETRO

GIANFRANCO PAOLETTI et L. AMATI

Stazione Sperimentale del Vetro - Murano-Venezia, Italia

**RIASSUNTO.** - *L'ottenimento di un vetro « incolore » è uno dei problemi principali dell'industria vetraria, per cui è particolarmente sentita la necessità di un continuo controllo e di una esatta definizione del termine « incolore ». Attualmente la determinazione della « non colorazione » è circoscritta al sistema I.C.I. attraverso misure eseguite allo spettrofotometro. La sensibilità dello spettrofotometro limita però le misure dei vetri incolori a campioni di dimensioni particolari con spessori rilevanti rispetto a quello presentato dalle lastre di vetro di normale produzione o ricavabile da altri articoli di vetro. Per questa ragione è stato progettato un apparecchio denominato decolorimetro con sensibilità tale da permettere la misura della « non colorazione » su campioni non differenziabili ad un esame visivo e per i quali i normali spettrofotometri non denunciano praticamente variazioni. L'apparecchio è stato studiato e realizzato nelle due versioni, una per l'esame di lamine a facce piane e parallele, l'altra per l'esame di campioni non riducibili a lamine come per esempio gli articoli di vetro temprato. Numerose prove sperimentali di cui sono riportate nel testo le più indicative hanno mostrato la possibilità di applicazione degli apparecchi alle necessità di un controllo industriale, nonché la elevata sensibilità e riproducibilità delle misure rispetto a quelle ottenibili con gli apparecchi tradizionali.*

**RÉSUMÉ.** - *La mesure de la non-couleur du verre est généralement effectuée au spectrophotomètre et est exprimée, après un calcul dans le système C.I.E. Cette méthode, tout en étant valable pour des mesures de laboratoire n'est pas recommandée pour un contrôle de fabrication dans l'industrie verrière, puisque dans ce cas il faudrait disposer d'échantillons fort épais et de dimensions particulières. Nous avons jugé utile pour cette raison d'étudier un appareil, qui pourrait être appelé « décolorimètre », capable de donner des indications directes sur la non-couleur des principaux produits verriers. Les caractéristiques principales du décolorimètre, pouvant être déduites des essais effectués et qui sont décrits dans le texte, sont: une sensibilité remarquable supérieure à celle du spectrophotomètre permettant aussi des mesures sur épaisseurs minces, une bonne reproductibilité des résultats, une grande rapidité et simplicité de mesure employant des échantillons pouvant être prélevés dans des objets en verre finis et qu' on peut aisément étalonner. Une version modifiée du décolorimètre en question permet aussi des mesures sur des objets en verre trempés, dont il serait autrement impossible d'extraire des échantillons.*

## Introduction.

L'un des principaux problèmes de l'industrie du verre est l'obtention du verre " incolore " : d'où la nécessité d'un contrôle permanent, dans certains secteurs, par exemple le verre à vitre et le verre creux.

Bien que l'on ait pris les précautions nécessaires, il existe toujours des facteurs imprévisibles ou difficiles à éliminer (impuretés des matières premières, corrosion des réfractaires, etc.) qui interviennent lors de la production d'un verre incolore et qui peuvent devenir eux-même une cause de coloration non désirée du verre.

L'élimination totale de ces causes n'étant pas possible, on a utilisé la décoloration pour dissimuler les couleurs indésirables au désavantage toutefois de la transmission du verre.

Suivre la production d'un verre incolore signifie donc contrôler la coloration indésirable, mais aussi réussir la décoloration.

Actuellement la détermination de la "non-couleur" est effectuée suivant le système I.C.I. (ou C.I.E.) à l'aide du spectrophotomètre.

La sensibilité du spectrophotomètre exige cependant des échantillons ayant des dimensions particulières, beaucoup plus épais que les produits normaux.

En outre le système de représentation des résultats, bien que scientifiquement valable, n'est pas certainement le plus adapté à un contrôle en usine.

On a donc étudié et mis au point un appareil qu'on pourrait appeler "décolorimètre", ayant une sensibilité supérieure à celle du spectrophotomètre et permettant aussi des mesures sur des épaisseurs inférieures. Cet appareil est utilisable pour les verres à vitre et pour les objets desquels on peut extraire des échantillons à faces planes et parallèles.

L'étalonnage de cet appareil est impossible sur des objets en verre trempé; on a donc réalisé un appareil basé sur un principe différent, permettant aussi des mesures directes sur les objets: la détermination de la non-couleur est ainsi possible sur un nombre considérable de produits.

La facilité de l'échantillonnage et la rapidité de la réponse, permettent aussi d'utiliser l'appareil pour des mesures de routine, comme les mesures d'évolution de la couleur dans une production "standard". De différences de couleur, n'apparaissant même pas au spectrophotomètre, sont mises en évidence grâce à la sensibilité élevée du "décolorimètre".

Avant de donner une description de l'appareil, il semble utile de rappeler brièvement quelquesunes des notions fondamentales relatives aux causes capables de compromettre la réussite d'un verre incolore.

## **Le verre "incolore".**

On a jusqu'à ici employé le terme "incolore" au lieu du terme "blanc", généralement adopté pour définir un verre ayant une coloration non appréciable à l'oeil, car ce terme semble le plus approprié pour représenter l'état de non-couleur du verre.

On emploie le terme "blanc", au sens large, dans le cas d'une absence

complète de couleur; cela dépend des diverses caractéristiques, non seulement physiques mais aussi psychiques et physiologiques de l'observateur.

Un objet est blanc jusqu'à ce que un autre ne paraisse plus blanc. Cela signifie qu'il n'est pas possible de définir visivement le blanc, sinon par rapport à un étalon de comparaison qu'on ne peut pas toujours aisément appliquer au cas du verre.

Les colorations non désirées, pouvant se présenter dans un verre "incolore", sont dues notamment aux impuretés des matières premières parmi lesquelles la plus fréquente est le fer, ainsi qu'à un excès de substances appelées "décolorants".

#### a) Colorations dues au fer

Les théories sur les colorations dues au fer peuvent être ramenées à celle proposée par Weyl (1) Stevels (2) (3) et l'autre par Moore (4) (5) (6) (7) et son école (8).

Tous les chercheurs ont effectué des mesures très soignées, mais les données déduites d'un point de vue structural ne sont pas entièrement concordantes.

La relation entre la couleur et la structure des verres renfermant du fer peut être, d'après Weyl, ainsi résumée:

- a) la coloration bleu dépend de l'interaction des ions  $Fe^{2+}$  et  $Fe^{3+}$ ;
- b) la coloration jaune est attribuable aux ions  $Fe^{3+}$  en tant que formateurs de réseau;
- c) l'absorption dans le proche ultraviolet est due aux ions  $Fe^{3+}$  en tant que modificateurs de réseau;
- d) l'absorption dans le proche infra-rouge est imputable aux ions  $Fe^{2+}$  agissant comme modificateurs (Stevels admet aussi la présence d'ions  $Fe^{2+}$  comme formateurs de réseau);
- e) la coloration grise qu' on peut noter dans de certains verres commerciaux peut être considérée comme la somme des colorations bleu et jaune.

Moore et ses élèves au moyen des mesures de susceptibilité magnétique ont, au contraire, tiré des conclusions différentes:

- a) la coloration bleu est due à l'ion ferreux;
- b) la coloration jaune est due à l'oxyde de fer ferrique sous forme colloïdale;
- c) l'absorption dans le proche ultra-violet est due à l'ion ferrique;
- d) la coloration grise est due au  $Fe_3O_4$  colloïdale.

Cette étude n'a pas pour but de juger les différentes théories, ni de proposer des interprétations structurales; il nous suffit de trouver les

éléments permettant la mesure de la "non-couleur". On doit donc avant tout considérer que tous les auteurs sont d'accord pour attribuer les colorations du visible, dans le cas des verres silicatés du commerce, au fer ferreux ionique ou colloïdal pour la coloration jaune et à l'ion ferreux ou à l'interaction avec l'ion ferrique pour la coloration bleu.

La coloration verte visible à l'œil nu dans les verres silicatés, peut s'expliquer à la fois par juxtaposition des deux colorations bleu et jaune et par un élargissement des bandes de transmission du bleu ou du jaune vers la zone intermédiaire du vert.

D'après ce qui précède, il paraît clair que la couleur due au fer dépend de sa forme ionique (formateur ou modificateur) ou colloïdale dans la structure, c'est à dire de la composition du verre et de l'équilibre ferreux-ferrique. Cet équilibre ferreux-ferrique est, à son tour, lié aux conditions de fusion et de recuit ainsi qu'à la composition du verre.

#### *b) Colorations dues aux procédés de décoloration*

L'impossibilité d'obtenir un verre incolore, par élimination du fer d'autres impuretés dans le verre, suggère la "dissimulation" par décoloration.

La décoloration on le sait, peut être obtenue par deux processus. Suivant le processus "chimique" le fer est oxydé au maximum (forme ferrique à laquelle correspond la coloration jaune). L'œil est plus sensible à la coloration jaune qu'à toute autre coloration du visible, mais à parité de concentration, l'ion ferreux donne une couleur dix fois plus marquée que l'ion ferrique. (Fig. 1).

L'autre processus de décoloration est "physique" et est réalisé par compensation de la coloration jaune, obtenue par le processus chimique, avec une coloration complémentaire en utilisant des substances appelées "décolorants". Par exemple dans le cas des verres silicatés du commerce, les décolorants physiques les plus utilisés sont l'oxyde de cobalt qui donne une coloration bleu claire et le selenium qui donne une coloration rose. Naturellement l'intensité de la coloration jaune sera d'autant plus marquée que la quantité de décolorant nécessaire sera plus grande; par conséquent, la transmission diminuera et le verre tendra vers le gris au lieu du blanc.

La courbe théorique d'un verre décoloré serait représentée par des valeurs égales de transmission à chaque longueur d'onde du visible, mais inférieures aux valeurs maxima du verre initial non décoloré.

#### **La mesure de la "non-couleur" du verre suivant des auteurs précédents.**

Presque toutes les mesures de la couleur, et donc aussi celles de la non-couleur, qui font l'objet de notre étude, sont liées aux conditions expérimentales.

Il va de soi qu' on doit toujours préciser la nature de la source lumineuse, l'épaisseur et souvent la forme de l'échantillon.

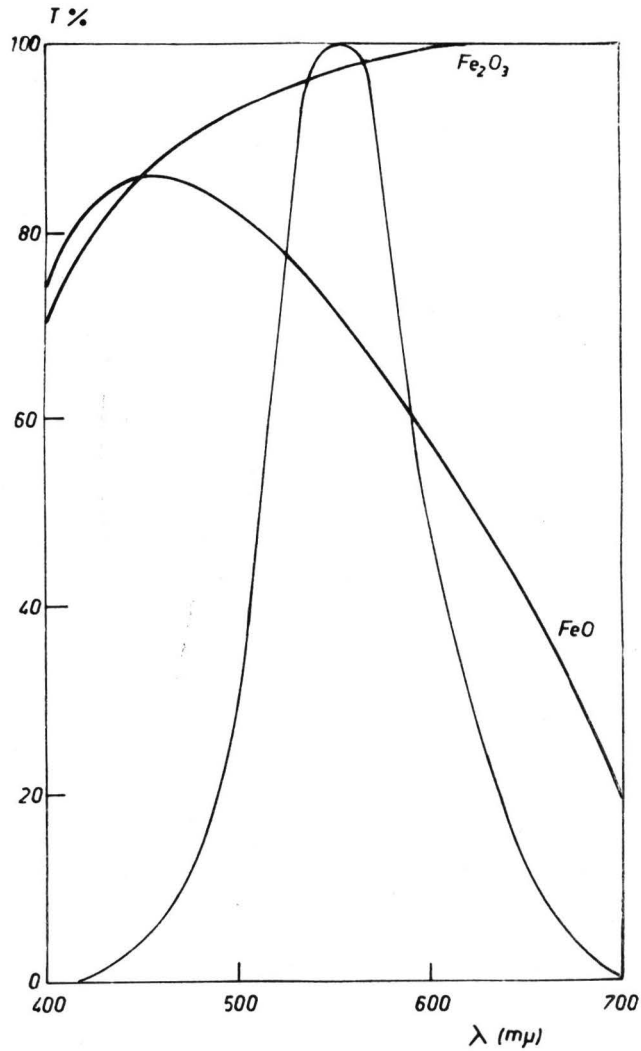


FIG. 1

Courbe de sensibilité de l'oeil humain et courbe de la transmission à la lumière de deux verres épais de 25 mm. renfermant 0,1%  $Fe_2O_3$  et 0,1%  $FeO$ , d'après Varghin (16).

Le système C.I.E.(9)(10) a procédé à la standardisation de trois sources de lumière: A, B et C: la première est constituée par une lampe

à incandescence à filament de tungstène à 2848° K, la deuxième correspond à la lumière du jour à midi et la troisième à la lumière solaire moyenne.

La mesure proprement dite est généralement effectuée à l'aide du spectrophotomètre. Les résultats des mesures spectrophotométriques, après un calcul approprié, sont reportés sur le diagramme trichromatique où il est possible de représenter la couleur de l'objet compte tenu de la source de lumière utilisée. Ce système permet de préciser la nature d'une couleur tant en ce qui concerne son intensité que sa tonalité.

La mesure de la "non-couleur" peut être, elle aussi, exprimée par le même système en utilisant une méthode de calcul proposée par Simmingsköld (11) en redimensionnant le papier trichromatique et en suivant la formule de Brechenridge et Schaub (12). Simmingsköld a introduit le facteur  $F$ , dont la valeur, déduite de la luminance et de la pureté permet de comparer les verres décolorés.

Cette détermination prévoit donc l'emploi du spectrophotomètre; étant donné les caractéristiques de l'appareil, il est nécessaire d'opérer sur des échantillons de 100 mm. d'épaisseur. Dans ces conditions le contrôle est limité à des échantillons qu'on ne peut généralement pas obtenir de l'objet fini.

Marchesini (13), employant des échantillons d'épaisseur inférieure, a indiqué de nouvelles possibilités de mesures de la "non-couleur" en les différenciant par rapport à un verre incolore idéal. Il a cependant démontré une fois de plus que l'emploi du spectrophotomètre avec des échantillons ayant les épaisseurs des produits finis, ne donne pas de valeurs de transmission nettes pour les échantillons présentant des différences peu appréciables, comme ce devrait être le cas pour un contrôle de fabrication.

D'autres auteurs (14) (15) ont étudié ce problème, mais plus en vue d'un mode de représentation que de la mise au point d'une technique de mesure.

### **Appareil proposé pour des mesures de routine.**

Les auteurs cités sont d'accord sur la possibilité de mesurer la décoloration au moyen du spectrophotomètre, mais la mesure est limitée à des échantillons d'épaisseur donnée et donc peu adaptée à des essais de routine.

A cet effet, on a étudié un appareil de sensibilité très élevée, permettant d'apprécier de petites différences même sur de faibles épaisseurs. Etant donné que les colorations possibles dans un verre incolore se rapportent, comme on l'a vu, à certaines zones du visible, la mesure se réduit à une évaluation de l'absorption dans le visible par des filtres appropriés correspondant à ces zones.

Il existe bien des colorimètres appelés "tristimulus", à filtre, permettant des mesures de routine, mais étant donné qu'ils sont construits



pour les mesures de la couleur, à cause de leur faible sensibilité ils ne donnent pas de mesures de la non-couleur.

Puisque l'appareil est destiné principalement à des mesures en vue d'un contrôle de fabrication, il a été mis au point de façon à donner des valeurs comparées à celles d'un verre de référence, exprimées, par commodité et rapidité, en unités arbitraires d'absorption. (u.a.A.).

La représentation schématique de l'appareil est donnée à la fig. 2. Le fonctionnement est le suivant: la lampe 1, alimentée par la batterie 3 et contrôlée par le rhéostat 2, envoie un faisceau de lumière à la photo-résistance 12, au moyen d'un système optique. Le faisceau de lumière est

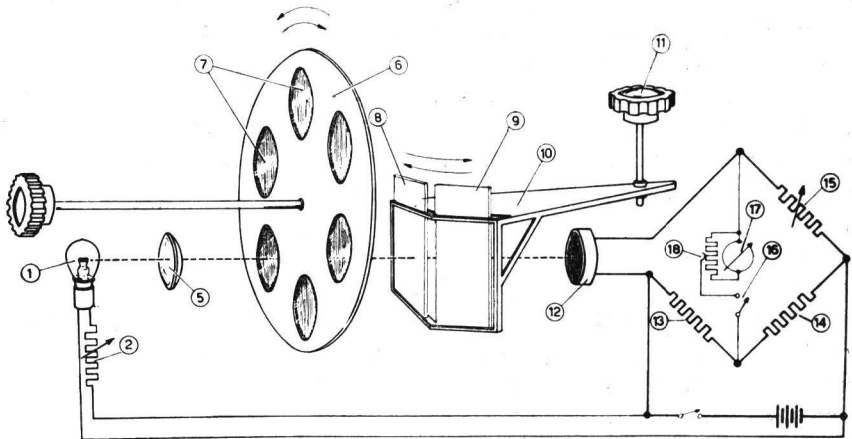


FIG. 2

Schéma de l'appareil de mesure de la non-couleur des échantillons en verre de forme plane.

sélectionné en fonction des diverses longueurs d'onde à l'aide des filtres 7 qui peuvent être insérés par rotation du porte-filtre 6 et, avant de rencontrer l'élément photo-sensible, il traverse la feuille de verre à examiner 8. Un support 10, qui peut être manoeuvré par la poignée 11, permet de placer successivement dans le faisceau lumineux le verre 8 et le verre de référence 9. Le support est construit de manière à placer ces verres dans une position toujours identique, par rapport à l'axe optique. L'opération est très rapide et permet en même temps de vérifier et, le cas échéant, de corriger pour chaque mesure la position du zéro. Les erreurs éventuelles de dérive, dues à la grande sensibilité de l'appareil, sont ainsi complètement éliminées.

L'élément photo-sensible 12 est constitué par une photo-résistance

au sulfure de cadmium insérée dans un pont de Wheatstone, dont les résistances 13 et 14 constituent les éléments fixes et la résistance variable 15 la branche de comparaison.

Le galvanomètre 17, à reflexion multiple et à échelle linéaire, muni d'un régulateur de sensibilité approprié 18, permet la lecture directe de la valeur d'absorption des verres. Dans ce cas, le galvanomètre est utilisé comme instrument à déviation et non comme instrument de zéro.

Etant donné les conditions de mesure (constance d'alimentation et différenciels très faibles d'absorption entre les différents verres qui se traduisent par de petites variations dans la valeur de la résistance de la cellule photoélectrique), l'erreur commise qui en résulte est négligeable. D'une manière générale les mesures ont été effectuées en choisissant convenablement deux verres de référence présentant respectivement une absorption inférieure (0) et une absorption supérieure (100) à celle des verres examinés. Après avoir choisi le filtre de couleur convenable, le pont est réglé de façon que le galvanomètre indique zéro lorsque le verre de référence (0) est examiné. Le verre (100) est ensuite mis en place et la sensibilité est réglée par l'emploi du réducteur 18 jusqu'à ce que le galvanomètre indique 0. De cette façon tous les verres à contrôler donnent des valeurs comprises entre 0 et 100 de l'échelle galvanométrique.

La stabilité de l'appareil, suffisante dans la plupart des cas, peut être encore augmentée en substituant à la résistance variable 15, dans la branche de comparaison du pont, une photo-résistance convenablement éclairée, ayant des caractéristiques semblables à celles du photo-élément 12.

### **Essais de mesure de la non-couleur d'échantillons plans.**

De nombreux essais ont été effectués en vue d'évaluer les possibilités de l'appareil compte tenu des considérations ci-dessus. Certains des essais ont été brièvement décrits et notamment ceux qui mettent en évidence la remarquable sensibilité de l'appareil vis à vis du spectrophotomètre, la linéarité des mesures en fonction de l'épaisseur ainsi que la reproductibilité des résultats.

On a jugé aussi intéressant de présenter les résultats d'un essai effectué sur 20 échantillons de verre à vitre, correspondant à plusieurs jours de fabrication, pour montrer la possibilité d'application de l'appareil ainsi qu'un cycle d'essais sur verres décolorés.

#### *a) Sensibilité*

La fig. 3 indique les valeurs d'absorption obtenues au décolorimètre avec un seul filtre rouge à bande de transmission voisine de  $670 \text{ m}\mu$  pour 10 morceaux de verres à vitre, ramenées par calcul à une seule épaisseur,

et les valeurs de transmission des mêmes échantillons mesurées au spectrophotomètre à la longueur d'onde de  $670 \text{ m}\mu$ . La différence de sensibilité est évidente sur la figure.

b) *Linéarité de la réponse du décolorimètre*

La fig. 4 donne les valeurs d'absorption obtenues au décolorimètre par l'emploi d'un filtre rouge à bande de transmission voisine de  $670 \text{ m}\mu$

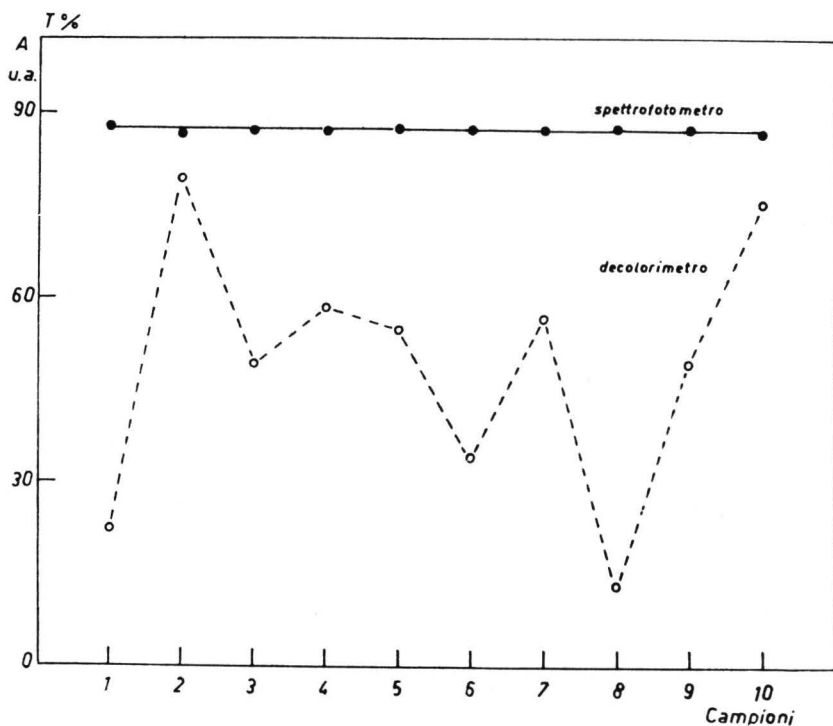


FIG. 3

Courbes de comparaison de la sensibilité pour mesures de la non-couleur entre le spectrophotomètre et le décolorimètre, sur 10 verres à vitre fabriqués à des jours différents, par l'emploi du filtre rouge ( $670 \text{ m}\mu$ ) pour le décolorimètre et à la longueur d'onde de  $670 \text{ m}\mu$  pour le spectrophotomètre.

de 30 verres épais de 1,75-5,75 mm., en prenant comme référence 0 le verre d'épaisseur minimum et comme référence 150 celui d'épaisseur maximum. La figure met en évidence la linéarité satisfaisante de la réponse de l'appareil. On peut noter en outre que l'alignement des points est meilleur lorsqu'on considère des épaisseurs comprises dans un intervalle limité, comme c'est le cas en pratique.

### c) Reproductibilité des mesures

Le tableau 1 présente les résultats de mesures obtenues avec un filtre rouge à bande de transmission voisine de  $670 \text{ m}\mu$  sur 10 morceaux de verres à vitre fabriqués le même jour.

Les résultats révèlent des écarts, bien que l'épaisseur soit presque égale, pouvant être attribués à la haute sensibilité de l'appareil aux variations des conditions superficielles.

On a donc effectué une sélection des échantillons à l'aide d'un filtre vert à bande de transmission voisine de  $560 \text{ m}\mu$ , c'est à dire de la couleur

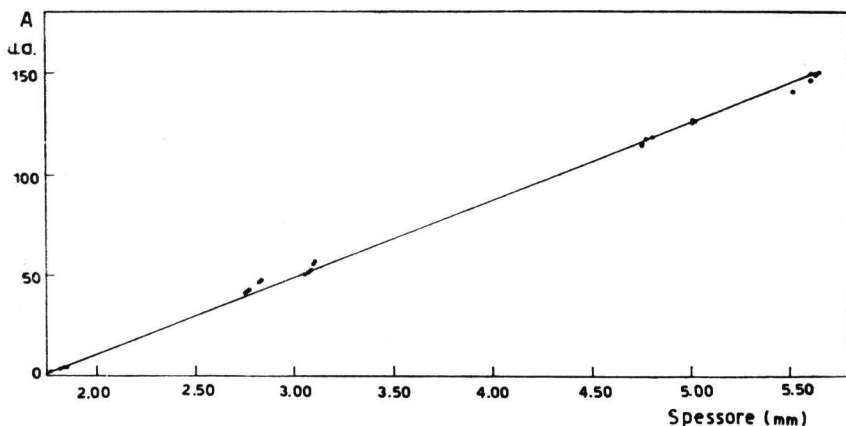


FIG. 4

Courbe représentant la linéarité de réponse du décolorimètre déduite des résultats obtenus sur 30 échantillons de verres à vitre d'épaisseur différente (1,75 - 5,75) en utilisant un filtre rouge ( $670 \text{ m}\mu$ ).

verte des verres, dans le but de distinguer l'absorption due aux conditions superficielles de celle due à la coloration dominante. Cet artifice permet de disposer d'échantillons présentant des conditions optiques superficielles pratiquement équivalentes.

Le tableau 1 met en évidence la correspondance des valeurs presque égales obtenues à parité d'épaisseur, par l'emploi de filtres vert et rouge.

De même, afin d'obtenir des conditions optiques superficielles équivalentes, une sélection des échantillons à l'aide d'un filtre solaire moyen est nécessaire dans le cas des verres décolorés.

Le tableau 1 indique également les résultats des mesures obtenues au filtre vert et au filtre rouge; on peut observer que les verres à vitre produits le même jour et ayant, au filtre vert, des valeurs voisines d'absorption, donnent au filtre rouge des valeurs d'absorption dans les limites expérimentales de reproductibilité.

TABLE I

Résultats des mesures effectuées à l'aide du décolorimètre sur dix échantillons de verres à vitre, fabriqués le même jour, avec le filtre rouge et le filtre vert.

| Echantillon (N.) | Épaisseur (mm) | Filtre rouge (u.a.A.) | Filtre vert (u.a.A.) |
|------------------|----------------|-----------------------|----------------------|
| 1                | 1,92           | 105                   | 62                   |
| 2                | 1,94           | 117                   | 66                   |
| 3                | 1,92           | 103                   | 60                   |
| 4                | 1,92           | 102                   | 61                   |
| 5                | 1,91           | 100                   | 59                   |
| 6                | 1,92           | 104                   | 60                   |
| 7                | 1,93           | 123                   | 71                   |
| 8                | 1,95           | 132                   | 66                   |
| 9                | 1,94           | 135                   | 71                   |
| 10               | 1,91           | 105                   | 64                   |

d) *Contrôle de la non-couleur des verres à vitre*

La fig. 5 montre les valeurs d'absorption obtenues pendant 20 jours consécutifs, lors d'un contrôle de production de verres à vitre de même épaisseur dont la différence de teinte faiblement verdâtre n'est pas décelable à l'oeil. Les valeurs retenues sont la moyenne des mesures obtenues avec un filtre rouge sur trois échantillons convenablement choisis parmi 10 autres produits le même jour et déjà contrôlés au filtre vert.

e) *Mesure de la non-couleur de verres décolorés*

La fig. 6 donne les valeurs différentielles d'absorption obtenues par mesure de la non-couleur de quatre échantillons prélevés dans des récipients parallélépipédiques par comparaison à un échantillon standard en verre décoloré ayant une courbe de transmission parfaitement rectiligne.

Les échantillons ont été obtenus, par carotage d'une des parois du récipient, sous forme de ronds de 50 mm. de diamètre. Les verres ont été polis après avoir été ramenés à 4,0 mm. d'épaisseur par meulage. Les mesures ont été effectuées à l'aide de quatre filtres: rouge, jaune, vert et bleu, en vue d'examiner les colorations éventuelles jaune et verte dues au fer ferreux et les couleurs rose et bleu dues aux décolorants sélénium et cobalt par l'emploi des filtres complémentaires correspondants.

**Appareil pour mesurer la non-couleur d'articles en verre trempé.**

La mesure de la non-couleur du verre peut être effectuée à l'aide de l'appareil décrit dans la partie précédente sur des échantillons à faces planes et parallèles.

Il y a toutefois des articles en verre desquels on ne peut pas extraire

d'échantillons: ce sont les articles trempés. Un recuit éventuel de ces échantillons en vue de procéder à une découpe, change la couleur du verre de sorte que les échantillons ne correspondent plus à l'article de départ; de toutes façons l'opération est longue et laborieuse.

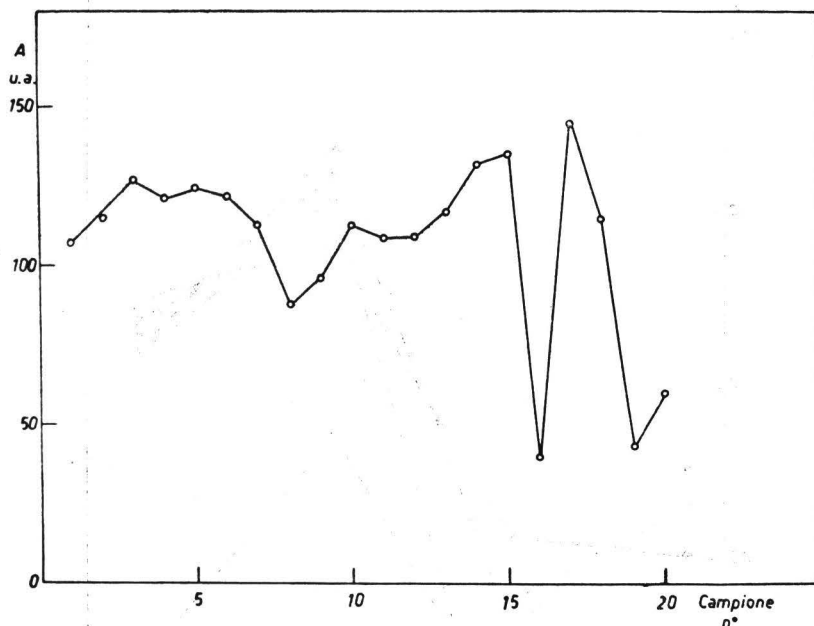


FIG. 5

Résultats des mesures effectuées à l'aide du décolorimètre par l'emploi du filtre rouge ( $670 \text{ m}\mu$ ) pour un contrôle de fabrication, pendant 20 jours consécutifs, de verres à vitre d'épaisseur égale.

Dans le but d'étendre la mesure de la non-couleur à ces types d'objets, on a jugé utile d'apporter des modifications à l'appareil décrit précédemment pour examiner directement les objets en verre trempé.

Le procédé de mesure peut être ainsi résumé:

- 1) recherche dans la série d'objets à examiner de zones présentant en lumière blanche des caractéristiques pratiquement égales de transmission lumineuse;
- 2) examen en lumière à diverses longueurs d'onde des zones sélectionnées précédemment en vue de déterminer les valeurs respectives d'absorption;
- 3) comparaison des valeurs obtenues pour les divers objets examinés.

La fig. 7 montre le schéma de l'appareil avec la modification apportée pour des mesures sur assiettes trempées. Il va de soi que le procédé peut

être étendu a tout autre objet en verre trempé. Le fonctionnement de l'appareil est le suivant: la lampe 1, alimentée par la batterie 3 et contrô-

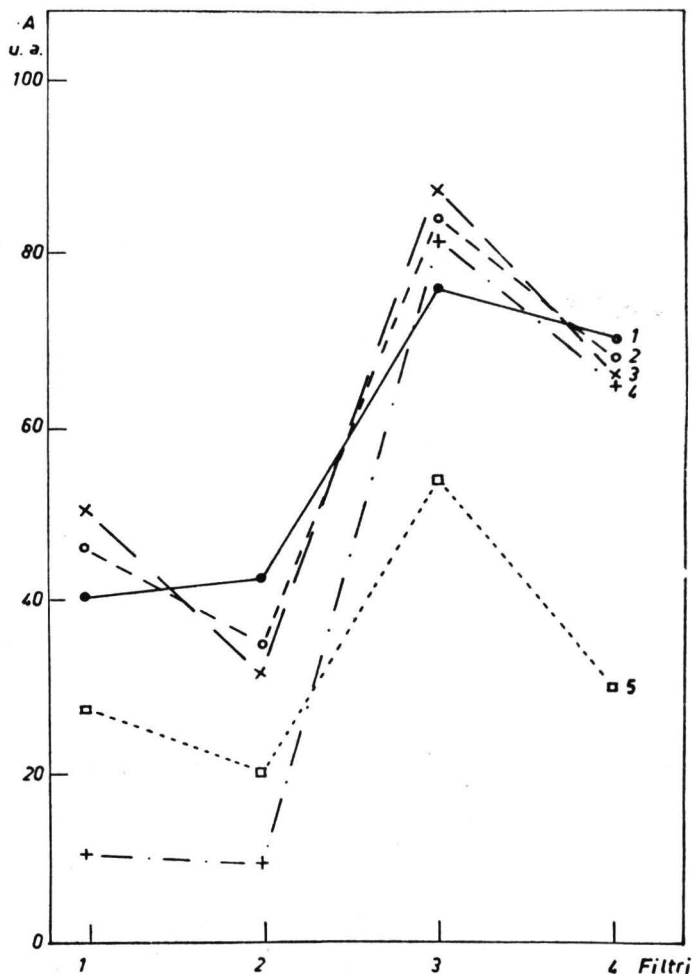


FIG. 6

Courbes de comparaison des valeurs différentiels d'absorption obtenues en mesurant la non-couleur d'échantillons prélevés dans cinq récipients divers de même forme, par l'emploi des filtres rouge (n. 1 - 670  $m\mu$ ), jaune n. 2 - 590  $m\mu$ ), vert (n. 3 - 560  $m\mu$ ) et bleu (n. 4 - 480  $m\mu$ ).

lée par le rhéostat 2, envoie un faisceau de lumière à la photo-résistance 11 au moyen du système optique 5. Le faisceau de lumière sélectionné par l'emploi d'une série de filtres 7, insérés par rotation du porte-filtre 6,

traverse un dispositif de tarage 9 et l'assiette 8 à examiner, avant de rencontrer l'élément photo-sensible. Ce dispositif posé sur un support (non indiqué sur la figure) permet à l'assiette de tourner autour de son centre de sorte que l'on peut explorer la totalité de la zone périphérique. Outre la rotation le support permet aussi d'introduire ou de retirer du faisceau lumineux un point quelconque choisi dans le bord de l'assiette.

Le disque porte-filtres 6, outre les filtres colorés, comprend aussi un filtre transformant le faisceau lumineux de la lampe 1 en lumière corre-

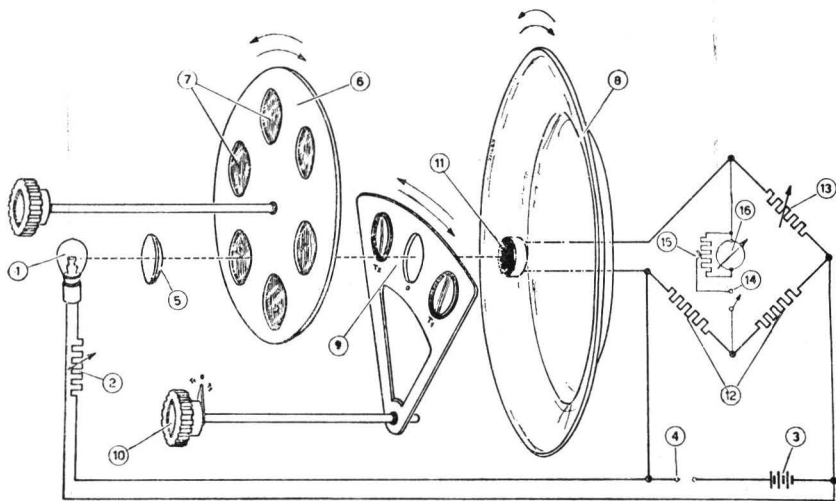


FIG. 7

Schéma de l'appareil de mesure de la non-couleur des articles en verre trempé.

spondant à la lumière solaire moyenne (luminance  $C$ ), qui est pratiquement exempte de couleurs dominantes; les assiettes à contrôler sont soumises à un examen préalable dans cette lumière. Il est ainsi possible de choisir, au cours de la rotation de l'assiette, une zone ayant pour toutes les assiettes la même transmission optique. Il va de soi que les examens successifs, effectués avec les filtres colorés, des diverses assiettes dans les zones optiquement correspondantes, préalablement décelées en lumière blanche, permettront sûrement de déterminer les absorptions aux différentes longueurs d'onde.

L'ensemble détecteur, suivant le schéma de la fig. 6, fonctionne comme l'appareil décrit plus haut pour la détermination de la non-couleur des verres en feuilles.

Par analogie avec ce qui a été dit sur cet appareil, il convient aussi pour l'examen des objets trempés, de pouvoir fixer sur l'échelle galvanométrique



une limite d'absorption minimum (point 0) et maximum (point 100) pour chaque série d'objets à examiner. Dans ce cas cependant, il est plus difficile de pouvoir disposer d'échantillons en verre de référence ayant les caracté-

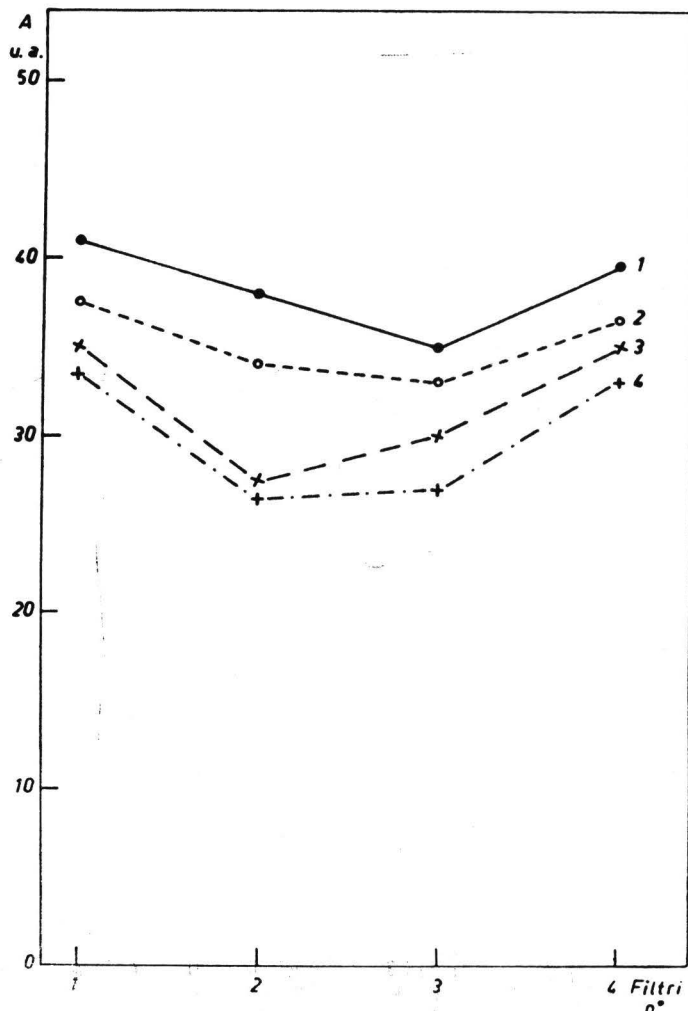


FIG. 8

Courbe de comparaison des résultats obtenus sur quatre assiettes diverses avec les filtres rouge (n. 1 - 670  $m\mu$ ), jaune (n. 2 - 590  $m\mu$ ), vert (n. 3 - 550  $m\mu$ ) et bleu (n. 4 - 480  $m\mu$ ).

ristiques de transmission nécessaires et exempts de couleurs dominantes.

On a donc préféré avoir recours aux "calibres" indiqués à la fig. 7 par  $T_1$  et  $T_2$ . Ces "calibres" sont constitués simplement par des éléments

opaques filiformes, interceptant partiellement, mais d'une façon reproductible le flux lumineux.

Il est évident qu'en fonction du diamètre et du nombre de fils con-

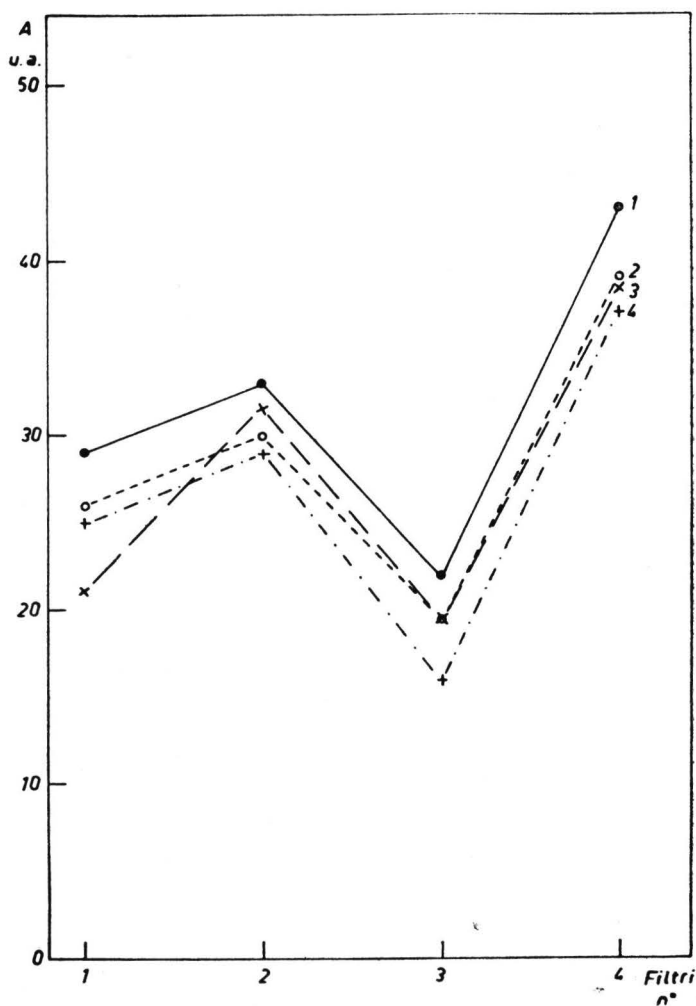


FIG. 9

Courbes de comparaison des résultats obtenus sur quatre verres (gobelets) par l'emploi des filtres rouge (n. 1 - 670  $m\mu$ ), jaune (n. 2 - 590  $m\mu$ ), vert (n. 3 - 550  $m\mu$ ) et bleu (n. 4 - 480  $m\mu$ ).

stituant le " calibre ", il sera possible de régler très aisément l'intensité lumineuse qui frappe la cellule et de déterminer par conséquent, sur l'échelle galvanométrique, les points 0 et 100.

Les calibres de ce genre peuvent être aisément dimensionnés suivant les valeurs d'absorption les plus différentes présentées par les séries diverses de corps à examiner.

Le procédé de mesure est le suivant: à l'aide du porte-filtres 7 on intercale le filtre de la couleur appropriée et les points 0 et 100 sont réglés à l'échelle galvanométrique au moyen des calibres  $T_1$  et  $T_2$ .

Une fois les calibres éliminés, le dispositif de tarage est réglé au 0 et l'assiette à examiner dans la zone préalablement repérée en lumière blanche est insérée dans le flux lumineux (voir fig. 6). Le procédé est répété, en employant les longueurs d'onde les plus convenables, pour toute la série d'assiettes.

La fig. 8 montre les résultats des mesures effectuées sur quatre assiettes différentes en utilisant les filtres suivants: le No. 1 voisin de  $670 \text{ m}\mu$ ; le No. 2 voisin de  $590 \text{ m}\mu$ , le No. 3 voisin de  $550 \text{ m}\mu$  et le No. 8 voisin de  $480 \text{ m}\mu$ . Comme on l'a déjà dit, par une modification du support, l'appareil permet d'effectuer des mesures sur des objets trempés de formes différentes. La fig. 9 reprend les résultats des mesures effectuées avec les mêmes filtres sur quatre gobelets différents.

## Conclusions.

La mesure de la non-couleur du verre est généralement effectuée au spectrophotomètre et est exprimée, après un calcul dans le système C.I.E.

Cette méthode, tout en étant valable pour des mesures de laboratoire, n'est pas recommandée pour un contrôle de fabrication dans l'industrie verrière, puisque dans ce cas il faudrait disposer d'échantillons fort épais et de dimensions particulières.

Nous avons jugé utile pour cette raison d'étudier un appareil, qui pourrait être appelé "décolorimètre", capable de donner des indications directes sur la non-couleur des principaux produits verriers.

Les caractéristiques principales du décolorimètre, pouvant être déduites des essais effectués et qui sont décrits dans le texte, sont: une sensibilité remarquable supérieure à celle du spectrophotomètre permettant aussi des mesures sur épaisseurs minces, une bonne reproductibilité des résultats, une grande rapidité et simplicité de mesure employant des échantillons pouvant être prélevés dans des objets en verre finis et qu'on peut aisément étalonner.

Une version modifiée du décolorimètre en question permet aussi des mesures sur des objets en verre trempés, dont il serait autrement impossible d'extraire des échantillons.

## REFERENCE

- (1) W. A. WEYL, *Coloured Glasses*, Soc. Gl. Techn., 1951.
- (2) J. M. STEVELS, *Ver Ref.*, 1950 vol. 4, p. 293.
- (3) J. M. STEVELS, *Proc. Intern. Comm. Glass*, 1954 vol. 1, p. 68.
- (4) H. MOORE et S. N. PRASAD, *J. Soc. Gl. Tech.*, 1949 vol. 33, p. 336.
- (5) H. MOORE et S. N. PRASAD, *J. Soc. Gl. Tech.*, 1950 vol. 34, p. 173-192.
- (6) H. MOORE et S. N. PRASAD, *J. Soc. Gl. Tech.*, 1950 vol. 34, p. 193-219.
- (7) H. MOORE et S. KUMAR, *J. Soc. Gl. Tech.*, 1951 vol. 35, p. 58.
- (8) A. ABOU EL AZM, *J. Soc. Gl. Tech.*, 1955 vol. 38, p. 101-276.
- (9) HARDY, *Handbook of Colorimetry*, The Technology Press, Cambridge 1936.
- (10) National Bureau of Standards, *Photoelectric Tristimulus Colorimetry with Three Filters*, Circular C 429, Washington 1942.
- (11) B. SIMMINGSKÖLD, IV. International Congress on Glass 1956.
- (12) BRECHENRIDGE et SCHAUB, *J. Opt. Soc. Am.*, 1939 vol. 29, p. 370.
- (13) L. MARCHESINI, *Vetro e Silicati*, 1959 vol. 3 n. 18 p. 8-13.
- (14) S. KUMAR et S. N. PRASAD, *S. Sci. Ind. Res.*, 1955 vol. 14B p. 63.
- (15) W. P. MAHONEY, *Cer. Ind.*, 1939 vol. 35.
- (16) V. V. VARGHIN, *La fabrication du verre coloré* - (en russe) Ghizljogh prom. 1940 (cit. en: I. E. SCHAPIRO, *Steklo i Keramika*, 1952, 9 n. 12 p. 7-11).

ETUDE COMPAREE DE L'OXYDE DE MAGNESIUM  
ET DU CARBONATE DE MAGNESIUM COMPRIME,  
EN VUE DE L'UTILISATION DE CE DERNIER  
COMME ETALON PRATIQUE DE BLANC  
MESURES EN VALEURS ABSOLUES DE LA REFLECTANCE  
SPECTRALE, DE SES VARIATIONS AVEC LA LONGUEUR  
D'ONDE ET AVEC LE TEMPS.  
INDICATRICES DE DIFFUSION.

JEAN GILLOD

Laboratoire National d'Essais - Paris

On sait que selon les recommandations de la C.I.E. on utilise comme étalon blanc de référence une couche d'oxyde de magnésium obtenue en brûlant dans des conditions définies du magnésium très pur; la fumée qui se forme se dépose par exemple sur des pastilles d'alumine frittée, ou sur une couche d'argent métallique, dépoli pour faciliter l'adhérence. Le magnésium utilisé peut être en ruban ou en copeaux. Bien que le facteur spectral de luminance varie un peu avec la longueur d'onde et qu'il soit un peu inférieur à l'unité, on le prend conventionnellement égal à l'unité, et ceci pour tout le spectre, dans les mesures comparatives avec d'autres matériaux, pourvu que la préparation de la couche d'oxyde de magnésium soit faite toujours avec soin dans les conditions prescrites et, en général, en l'éclairant normalement et en faisant les mesures de luminance à 45°. La couche s'altère avec le temps et doit être rejetée 4 heures après sa confection. En plus elle est très fragile. A cause de tout cela sa confection et son emploi restent très délicats; il serait très désirable, dans la pratique, d'avoir à sa disposition un étalon plus maniable immédiatement disponible et conservant ses propriétés optiques pendant un assez long temps, un an par exemple, moyennant quelques précautions élémentaires. Le carbonate de magnésium préparé dans des conditions physiques et chimiques reproductibles et comprimé sous forme de pastilles de diamètres pouvant varier de 20 à 30 mm a déjà été préconisé et semblerait satisfaire aux exigences pratiques: facteurs de luminances élevés, variant peu avec la longueur d'onde, bonne reproductibilité, emploi facile et bonne conservation.

C'est pourquoi nous avons entrepris une étude comparative des propriétés des couches d'oxyde de magnésium et des surfaces de carbonate de magnésium comprimé. Dans ce qui suit nous indiquerons sommairement les modes de préparation, les méthodes de mesures absolues des facteurs spectraux de luminance, leurs variations avec le temps, et les propriétés diffusantes de ces surfaces.

Couches I - Préparation des couches d'oxyde de magnésium et mesures en valeurs absolues de leurs facteurs spectraux de luminance.

La méthode utilise, comme l'ont déjà fait quelques auteurs (1), mais avec quelques variantes, une sphère d'intégration. Celle-ci en métal blanc, dépoli à l'intérieur, est démontable en quatre parties, soit deux hémisphères et deux calottes sphériques amovibles, identiques. Le diamètre intérieur est de 80 mm et celui des calottes sphériques amovibles est de 30 mm.

La figure montre une coupe de l'ensemble de la sphère par un plan passant par son centre et le sommet des deux calottes amovibles.

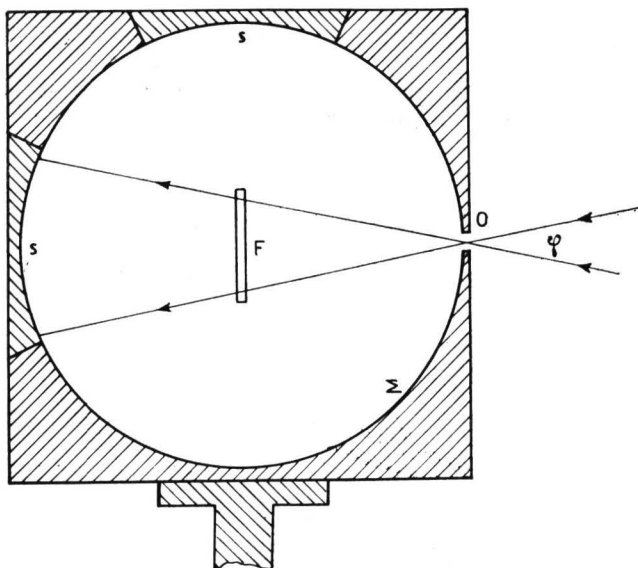


FIG. 1

Le flux lumineux éclairant la sphère pénètre dans celle-ci par une petite ouverture  $O$  en éclairant d'abord une partie de l'une des calottes amovibles, l'ouverture  $O$  étant dans l'axe de celle-ci. On peut admettre que par suite des réflexions multiples et des propriétés diffusantes de la surface interne de la sphère, (la diffusion se faisant sensiblement selon la loi de Lambert), l'éclairage de tout le reste de la sphère est uniforme si l'enduit qui la recouvre est lui même uniforme. Le flux lumineux est obtenu par une lampe à ruban de tungstène dont l'alimentation contrôlée est maintenue constante pendant toute la durée des expériences.

Pour mesurer cet éclairage on a ménagé dans le fond de la sphère une fente de 15 mm de long et 1 mm de large. On projette l'image de cette fente sur la fente d'entrée d'un spectrophotomètre enregistreur. La

mesure du flux monochromatique à la fente de sortie de cet appareil est proportionnelle pour chaque longueur d'ond au flux lumineux de même longueur d'onde sortant de la fente.

On commence par réaliser sur toute la surface des hémisphères et des deux calottes une couche d'oxyde de magnésium. Pour obtenir une couche assez adhérente et d'épaisseur sensiblement uniforme nous avons réalisé un montage électrostatique permettant d'établir une différence de potentiel de 600 volts entre l'hémisphère traitée et le ruban de magnésium en combustion. Ce ruban d'origine anglaise était à 99,9% de pureté, largeur 3 mm, épaisseur 0,2 mm. La couche d'oxyde réalisée avait 0,8 mm d'épaisseur. Les deux hémisphères traitées séparément étaient ensuite assemblées avec précaution.

La sphère, étant alors éclairée comme il a été dit précédemment, en faisait successivement au spectrophotomètre deux enregistrements le premier avec la sphère toute entière, la deuxième après avoir enlevé la calotte sphérique supérieure.

Soit  $x_\lambda$  le facteur spectral de luminance pour la longueur d'onde. Soit  $K_\lambda$  le rapport des ordonnées des courbes enregistrées pour cette même longueur d'onde. Soit enfin  $r$  le rapport de la surface de la calotte sphérique enlevée, à la surface totale de la sphère.

On démontre que l'on a la relation:

$$x_\lambda = \frac{K_\lambda - 1}{K_\lambda - 1 + r}$$

### **Précision de la mesure.**

La discussion montre que pour une valeur approximative de  $K_\lambda$ , par ex.: 0,96 la précision est maximum pour une valeur convenablement choisie du rapport  $r$ , soit environ 0,03.

Il est remarquable aussi que les erreurs relatives de 1/100 par ex. sur les mesures des rapports  $K_\lambda$  et  $r$  n'entraînent qu'une erreur absolue inférieure à 0,0007 sur la mesure de  $x_\lambda$ . De ce fait les valeurs expérimentales trouvées pour les valeurs de  $x_\lambda$  peuvent être considérées comme connues à mieux que 0,001 près en valeur absolue. Cependant pour obtenir ce résultat une correction a été faite pour tenir compte de l'existence des deux petites ouvertures de la sphère; la fente de sortie et l'orifice d'entrée de la lumière.

### *II - Préparation des plaquettes de carbonate de magnésie comprimé et mesures en valeurs absolues de leurs facteurs spectraux de luminance.*

Il existe dans le commerce pharmaceutique un carbonate de magnésie vendu sous le nom de « magnésie des pharmaciens » qui se comprime très

bien et donne avec fidélité des surfaces blanches pouvant servir d'étalons de référence. Cependant comme rien ne garantit à priori un produit constant dans sa composition et ses propriétés, il vaut mieux préparer le carbonate de magnésie selon un procédé décrit assez minutieusement pour être assuré de propriétés reproductibles et bien définies.

Sans vouloir entrer ici dans tous les détails opératoires disons que nous sommes partis d'une solution de chlorure de magnésium pur traitée à température constante par une solution de carbonate de sodium pur. En vue d'obtenir une granulation aussi régulière que possible (grain d'environ un micron) la précipitation est réalisée de façon que reste constante la concentration de chlorure de sodium résultant de la réaction. Le produit lavé, essoré, séché donne finalement à l'analyse les résultats suivants:

|                     |         |           |         |
|---------------------|---------|-----------|---------|
| eau de constitution | 11,1%   | humidité: | 7,4%    |
| CO <sub>2</sub>     | : 37,7% | MgO       | : 43,8% |

Ce produit est transformé en pastilles par moulage sous pression d'environ 500 Kg/cm<sup>2</sup> dans des moules spéciaux en acier chromé. La surface du piston est dépolie au jet de sable pour obtenir une surface de pastille aussi mate que possible. L'expérience a montré qu'une variation assez grande de la pression de moulage allant jusqu'à 30% ne modifie pas les propriétés optiques. Les pastilles d'environ 5 mm d'épaisseur sont fixées dans des boîtes de protection dont le fond est en aluminium poli.

Les facteurs spectraux de réflexion d'une telle surface plane pourraient être mesurés en valeur absolue par la méthode décrite par J. Terrien (2). Nous avons préféré mettre à profit la connaissance en valeur absolue, d'après la méthode précédente, des réflectances spectrales d'une couche de MgO, fraîchement préparée pour mesurer ensuite en valeurs relatives, par rapport à cette couche de MgO, les réflectances spectrales d'une pastille de carbonate.

Il suffit pour cela d'utiliser la méthode suivante:

Dans la sphère précédente l'une des calottes amovibles qu'on peut pratiquement confondre avec un plan est constituée par la surface de carbonate de magnésie, l'autre par une couche de MgO. Soit  $y_\lambda$  et  $x_\lambda$  les facteurs spectraux de luminance correspondants.

Comme précédemment le flux entrant dans la sphère et maintenu constant à mieux que 1/1000 près est envoyé d'abord sur la surface de carbonate substituée à l'une des calottes sphériques, l'autre étant constituée par MgO. On réalise ainsi un premier enregistrement.

Ensuite on fait dans les mêmes conditions un deuxième enregistrement après avoir simplement interverti les deux surfaces de carbonate et d'oxyde.

On démontre facilement que dans ces conditions le rapport  $K$  des mesures faites au spectrophotomètre pour une longueur d'onde donnée est



égal au rapport  $\frac{y_\lambda}{x_\lambda}$  des facteurs spectraux de luminance relatifs aux deux surfaces.

La connaissance de  $x_\lambda$  en valeur absolue permet donc de passer à la valeur absolue de  $y_\lambda$ . La précision dépend évidemment de celle avec laquelle on peut mesurer  $K_\lambda$ . En se plaçant dans les meilleures conditions expérimentales possibles la mesure du rapport  $K_\lambda$  peut se faire à 3/100 près.

### Résultats des mesures.

Les résultats sont condensés dans le tableau suivant qui comporte 4 colonnes: la première donne les longueurs d'onde  $\lambda$  en millimicrons, la deuxième les valeurs absolues des facteurs spectraux de luminance  $x_\lambda$  de l'oxyde de magnésium fraîchement préparé, la troisième ces mêmes valeurs  $x_\lambda$  mesurées 7 jours après la préparation de la couche de *MgO*. Enfin la 4<sup>e</sup> colonne donne les rapports  $K_\lambda$  de l'étalon au carbonate de *Mg* par rapport à l'étalon *MgO* fraîchement préparé. Les valeurs de ces derniers rapports sont confirmées par un enregistrement direct avec un spectrophotomètre Hardy.

| $\lambda$ | $x_\lambda$        | $x'_\lambda$       | $K_\lambda$       |
|-----------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 800       | 0,974              | 0,975              | 1,02              |
| 774       | 0,975 <sub>5</sub> | 0,975              | 1,01              |
| 748       | 0,974 <sub>5</sub> | 0,974              | 1,01              |
| 724       | 0,974              | 0,975              | 0,99 <sub>8</sub> |
| 703       | 0,975              | 0,976              | 0,99 <sub>7</sub> |
| 684       | 0,977              | 0,977              | 0,99 <sub>6</sub> |
| 665       | 0,977              | 0,978              | 0,99 <sub>5</sub> |
| 647       | 0,978              | 0,977 <sub>5</sub> | 0,99 <sub>4</sub> |
| 628       | 0,978 <sub>5</sub> | 0,978              | 0,99 <sub>4</sub> |
| 609       | 0,979 <sub>5</sub> | 0,979              | 0,99 <sub>4</sub> |
| 590       | 0,980              | 0,979              | 0,99 <sub>3</sub> |
| 570       | 0,981              | 0,980 <sub>3</sub> | 0,99 <sub>3</sub> |
| 550       | 0,981              | 0,980              | 0,99 <sub>0</sub> |
| 532       | 0,981              | 0,980              | 0,98 <sub>7</sub> |
| 514       | 0,981 <sub>5</sub> | 0,980              | 0,98 <sub>2</sub> |
| 496       | 0,981 <sub>5</sub> | 0,979 <sub>5</sub> | 0,98 <sub>0</sub> |
| 476       | 0,981              | 0,978 <sub>5</sub> | 0,97 <sub>5</sub> |
| 457       | 0,981              | 0,977 <sub>5</sub> | 0,94 <sub>8</sub> |
| 438       | 0,981 <sub>5</sub> | 0,976 <sub>5</sub> | 0,95 <sub>8</sub> |
| 420       | 0,980 <sub>5</sub> | 0,975              | 0,95 <sub>4</sub> |
| 403       | 0,978              | 0,971 <sub>5</sub> | 0,95 <sub>0</sub> |

L'examen de ce tableau montre que les facteurs de luminance du carbonate sont comparables à ceux de  $MgO$  pour les grandes longueurs d'onde et même un peu plus élevés. Ils diminuent assez nettement et jusqu'à 5% vers les petites longueurs d'onde tandis qu'on observe au contraire une légère augmentation dans le cas de  $MgO$  jusqu'à vers 480  $m\mu$ . L'amplitude des variations dans l'ensemble est vraiment très faible pour  $MgO$  qui est donc assez voisin du blanc parfait.

Mais par contre on remarque une variation nettement sensible pour ce dernier matériau avec le temps et celle-ci correspond à une diminution des facteurs de luminance dans la région du bleu et du violet c'est-à-dire à un jaunissement, même, comme ce fut le cas dans ces expériences, lorsque la couche a été conservée à l'abri de la lumière. Divers auteurs ont signalé d'ailleurs un jaunissement plus important et plus rapide sous l'action de l'ultra-viole.

Nous avons cherché à vérifier si de telles variations pouvaient se produire avec des étalons au carbonate de magnésium comprimé. Pour cela nous avons pendant un an conservé deux étalons bien à l'abri des poussières, l'un à l'obscurité dans une atmosphère sèche, l'autre à la lumière naturelle dans une atmosphère saturée d'humidité. Nous avons fait périodiquement des mesures de réflectance en comparant chaque fois avec un étalon de  $MgO$  fraîchement préparé. Les variations observées, qui n'atteignaient pas 0,5%, étaient du même ordre de grandeur que la précision obtenue dans ces comparaisons.

### **Etude des qualités diffusantes.**

Cette étude a été faite à l'aide d'un appareil spécialement construit au laboratoire et permettant d'obtenir par enregistrement les variations de luminance en fonction de l'angle d'observation quand l'étalon est éclairé normalement.

Ces variations peuvent être caractérisées pour une surface qui se rapproche du diffuseur parfait par le rapport des luminances mesurées dans des directions faisant  $\pm 60^\circ$  avec la normale, avec les luminances mesurées dans des directions faisant  $\pm 10^\circ$  avec la normale à la surface diffusante.

Ce rapport serait égal à l'unité pour un diffuseur parfait. Il a constamment été trouvé égal à 0,90 pour les étalons au carbonate et à 0,87 pour les étalons à l'oxyde de magnésie.

Ces derniers se révèlent donc inférieurs aux précédents au point de vue de leurs qualités orthotropes.

### **Conclusion.**

Un étalon blanc à base de carbonate de magnésium préparé selon une méthode bien définie à partir de chlorure de magnésium pur et de carbonate

de sodium pur possède des facteurs spectraux de luminance comparables à ceux d'une couche d'oxyde de magnésium préparée selon les recommandations de la C.I.E. Ils sont toutefois plus faibles pour les petites longueurs d'onde et l'amplitude des variations dans l'ensemble du spectre est un peu plus élevée.

Un tel étalon est au moins aussi bien reproductible que l'étalon de  $MgO$  si l'on remarque que le mode de préparation de ce dernier et la pureté du magnésium utilisé lors de la combustion jouent un rôle important.

Les propriétés orthotropes sont nettement meilleures; enfin la grande supériorité de ce carbonate de magnésie comprimé, pour les utilisateurs pratiques de l'industrie, c'est que, moyennant quelques précautions élémentaires évidentes, cet étalon est robuste et conserve ses propriétés assez longtemps pour qu'on puisse en disposer instantanément à tout moment sans une manipulation préalable longue et fastidieuse; au contraire les couches à base d'oxyde s'altèrent très vite soit par l'action prolongée de la lumière, soit à cause de leur extrême fragilité, si bien qu'il faut pratiquement les renouveler à chaque manipulation. Le coût de cette opération n'est d'ailleurs pas négligeable.

L'étalon à base de  $MgO$  peut, il est vrai, être préparé par l'utilisateur lui-même tandis que les étalons sous forme de plaquettes de carbonate de Magnésium comprimé ne peuvent être construits que par un laboratoire possédant l'outillage nécessaire.

Si l'on a besoin de vérifier périodiquement que les propriétés diffusantes de l'étalon ne se sont pas modifiées on peut le comparer à un étalon secondaire tel qu'une plaquette d'opaline dont la seule qualité est d'être inaltérable par nature et dont les facteurs spectraux de réflectance ont été mesurés une fois pour toutes.

(1) MILLER et SANT, *J.O.S.A.*, t. 48 n. 11, nov. 1958.

(2) J. TERRIEN, *Bull. Soc. Fr. Electriciens*, 7<sup>e</sup> série t. 4, mai 1956.

# COMPARAISON DES REPRESENTATIONS PLANES A ESPACEMENT UNIFORME

CLAUDE LELEU

Société Harshaw-Poulenc-Coiffe - Neuilly, France

Une représentation plane à espacement uniforme doit se conformer à la condition suivante: « Toutes les distances correspondant à une différence de couleurs juste perceptible sont représentées par des segments égaux sur toute l'étendue du diagramme ».

On sait que le diagramme C.I.E. répond très mal à cette condition: les segments sont de longueurs très inégales suivant les différentes parties du diagramme. Les travaux de Wright ont montré que pour ce diagramme, dans le cas le plus défavorable, le rapport des longueurs de segments peut atteindre  $\frac{20}{1}$ . Est-il possible d'imaginer une représentation

plane pour laquelle le rapport serait de  $\frac{1}{1}$  et qui remplirait intégralement la condition indiquée ci-dessus?

Puisque nous savons que le diagramme C.I.E. a été choisi parmi d'autres qui peuvent se déduire l'un de l'autre par transformation projective, il pourrait sembler aisé de transformer le diagramme C.I.E. en un diagramme à espacement uniforme. Malheureusement, la théorie démontre qu'une transformation de ce genre n'est pas possible (6) dans un plan mais seulement dans l'espace, c'est pourquoi l'on est conduit à se contenter d'une représentation plane à échelonnement presque uniforme qui respecte autant qu'il est possible l'uniformité de chromaticité.

C'est cette voie qui a été suivie avec succès par les travaux de Judd (2)(3), Mac-Adam (4), Breckenridge et Schaub (5). Les diagrammes proposés présentent de notables différences mais il est malaisé d'apprécier leurs avantages respectifs en lisant ces travaux parce que leurs auteurs n'envisagent pas tous le problème sous le même angle. Chargé par le Comité d'Etudes des bases théoriques de la Colorimétrie de l'Association Française de Colorimétrie d'une étude bibliographique sur les représentations planes à espacement uniforme, nous avons cherché à établir une

comparaison valable entre les différents systèmes proposés pour essayer de mettre en évidence la solution la plus favorable.

★

Nous avons utilisé la méthode de transformation donnée par Mac-Adam parce qu'elle a la valeur générale nécessaire pour effectuer une comparaison valable.

Le nouveau système aura pour équations de base par rapport à  $X, Y, Z$ :

$$U = a_1 X + a_2 Y + a_3 Z$$

$$V = a_4 X + a_5 Y + a_6 Z$$

$$W = a_7 X + a_8 Y + a_9 Z$$

et sera défini de façon univoque par les 9 coefficients  $a_1 \dots a_9$ .

Le diagramme plan  $u, v$  sera défini par les équations  $u = f(x, y)$  et  $v = f(x, y)$ . Pour établir ces équations, on se souvient que:

$$u = \frac{U}{U + V + W} \quad \text{et} \quad v = \frac{V}{U + V + W}$$

$$u = \frac{a_1 X + a_2 Y + a_3 Z}{(a_1 + a_4 + a_7) X + (a_2 + a_5 + a_8) Y + (a_3 + a_6 + a_9) Z}$$

Mais comme

$$X = x(X + Y + Z)$$

$$Y = y(X + Y + Z)$$

$$Z = z(X + Y + Z)$$

$$u = \frac{a_1 x(X + Y + Z) + a_2 y(X + Y + Z) + a_3 z(X + Y + Z)}{(a_1 + a_4 + a_7) x(X + Y + Z) + (a_2 + a_5 + a_8) y(X + Y + Z) + (a_3 + a_6 + a_9) z(X + Y + Z)}$$

On divise haut et bas par  $X + Y + Z$  et, si l'on se souvient que  $z = 1 - x - y$ , on peut écrire:

$$u = \frac{x(a_1 - a_3) - y(a_2 - a_3) + a_3}{x(a_1 + a_4 + a_7 - a_3 - a_6 - a_9) + y(a_2 + a_5 + a_8 - a_3 - a_6 - a_9) + a_3 + a_6 + a_9}$$

On obtient de même

$$v = \frac{x(a_4 - a_6) + y(a_5 - a_6) + a_6}{x(a_1 + a_4 + a_7 - a_3 - a_6 - a_9) + y(a_2 + a_5 + a_8 - a_3 - a_6 - a_9) + a_3 + a_6 + a_9}$$

Si nous posons:

$$c_1 = a_1 - a_3 \quad c_2 = a_2 - a_3 \quad c_3 = a_3 \quad c_4 = a_4 - a_6 \quad c_5 = a_5 - a_6 \quad c_6 = a_6$$

$$c_7 = a_1 + a_4 + a_7 - a_3 - a_6 - a_9$$

$$c_8 = a_2 + a_5 + a_8 - a_3 - a_6 - a_9$$

$$c_9 = a_3 + a_6 + a_9$$

on a :

$$u = \frac{c_1 x + c_2 y + c_3}{c_7 x + c_8 y + c_9}$$

$$v = \frac{c_4 x + c_5 y + c_6}{c_7 x + c_8 y + c_9}$$

Les 9 coefficients  $c_1 \dots c_9$  déterminent la position du triangle C.I.E. par rapport aux axes  $u$  et  $v$ . Ce triangle sera connu et défini par les coordonnées des points X, Y, Z et par la position et les coordonnées du point E. On sera de plus renseigné sur la forme du triangle XYZ par le rapport

$$\frac{ZX}{ZY}$$

Nous donnons ci-dessous la signification de ces différents termes qui s'expriment tous en fonction de  $c_1 \dots c_9$

|   |   |  |
|---|---|--|
| X | $u_x = \frac{c_1 + c_3}{c_7 + c_9}$ $v_x = \frac{c_4 + c_6}{c_7 + c_9}$   |  |
| Y | $u_y = \frac{c_2 + c_3}{c_8 + c_9}$ $v_y = \frac{c_5 + c_6}{c_8 + c_9}$   |  |
| R | $u_z = c_3$ $v_z = c_6$   |  |
| E | $u_E = \frac{c_1 + c_2 + 3c_3}{c_7 + c_8 + 3c_9} \quad \frac{ZP}{PX} = C_7 + C_9$ $v_E = \frac{c_4 + c_5 + 3c_6}{c_7 + c_8 + 3c_9} \quad \frac{ZQ}{QY} = C_8 + C_9$ |  |

$$\frac{ZX}{ZY} = \sqrt{\left(\frac{c_1 + c_3}{c_7 + c_9} - c_3\right)^2 + \left(\frac{c_4 + c_6}{c_7 + c_9} - c_6\right)^2} / \left( \left(\frac{c_2 + c_3}{c_8 + c_9} - c_3\right)^2 + \left(\frac{c_5 + c_6}{c_8 + c_9} - c_6\right)^2 \right)^{1/2}$$

Les équations de transformation que nous avons comparées sont les suivantes par ordre chronologique:

Judd (1935)

$$u = \frac{2,7760x + 2,1543y - 0,1192}{-1,0x + 6,3553y + 1,5405}$$

$$v = \frac{-2,9446x + 5,0323y + 0,8283}{-1,0x + 6,3553y + 1,5405}$$

Mac Adam (1937)

$$u = \frac{4x/3}{-2/3x + 4y + 1}$$

$$v = \frac{2y}{-2/3x + 4y + 1}$$

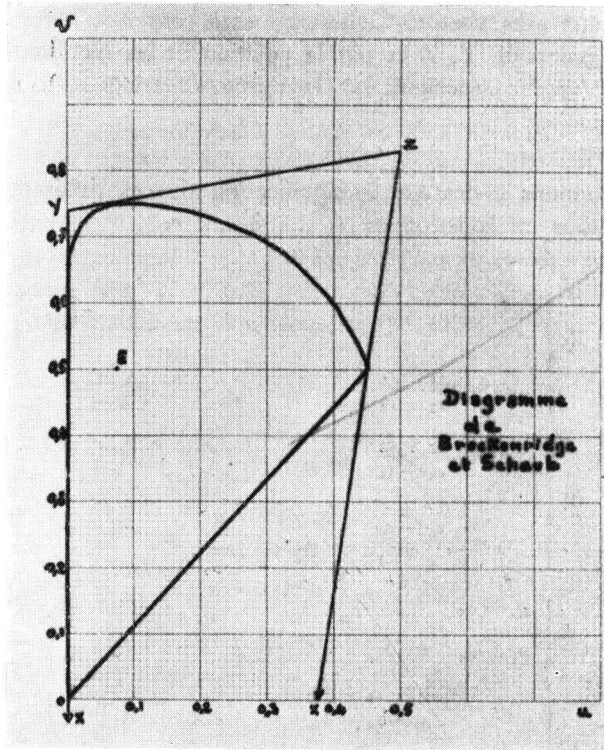


FIG. 1

Breckenridge et Schaub (1939)

$$u = \frac{0,83303x + 0,83303y - 0,83303}{x - 7,05336y - 1,64023}$$

$$v = \frac{3,6970x - 5,07713 - 1,36896}{x - 7,05336y - 1,64023}$$

Judd (1944)

$$u = \frac{0,4661 + 0,1593y}{y - 0,15735x + 0,2424}$$

$$v = \frac{0,6581x}{x - 0,15735x - 0,2424}$$

Pour que notre comparaison soit valable, nous avons pris pour les autres formules la même valeur de  $c_9$  — soit 1 — que dans la formule de Mac-Adam. Pour chaque formule les coefficients  $c_1$  .....  $c_8$  ont donc été divisés par  $c_9$ .

Nous avons pu alors dresser le tableau ci-dessous qui donne pour les quatre formules les renseignements concernant les diagrammes correspondants:

|                                    | Judd<br>1935 | Mac Adam<br>1937 | Breck. Sch.<br>1939 | Judd<br>1944 |
|------------------------------------|--------------|------------------|---------------------|--------------|
| $c_1$                              | 1,80         | 1,33             | - 0,50              | 1,92         |
| $c_2$                              | 1,40         | 0                | - 0,50              | 0,66         |
| $c_3$                              | - 0,07       | 0                | + 0,50              | 0            |
| $c_4$                              | - 1,91       | 0                | - 2,25              | 0            |
| $c_5$                              | + 3,23       | 2,00             | + 3,10              | 2,71         |
| $c_6$                              | + 0,54       | 0                | + 0,83              | 0            |
| $c_7$                              | - 0,65       | - 0,66           | - 0,60              | - 0,65       |
| $c_8$                              | 4,13         | 4,00             | + 4,30              | 4,13         |
| $c_9$                              | 1,00         | 1,00             | 1,00                | 1,00         |
| $u_x$                              | 4,91         | 4,00             | 0                   | 5,48         |
| $v_x$                              | - 3,91       | 0                | - 3,56              | 0            |
| $u_y$                              | 0,26         | 0                | 0                   | 0,13         |
| $v_y$                              | 0,74         | 0,40             | 0,74                | 0,53         |
| $u_z$                              | - 0,07       | 0                | + 0,50              | 0            |
| $v_z$                              | + 0,53       | 0                | 0,83                | 0            |
| ZP/PX                              | 0,35         | 0,34             | 0,40                | 0,35         |
| ZQ/QY                              | 5,13         | 5,00             | 5,30                | 5,13         |
| $u_E$                              | 0,45         | 0,21             | 0,075               | 0,40         |
| $v_E$                              | 0,06         | 0,32             | 0,50                | 0,42         |
| ZX/ZY                              | 11           | 10               | 8,8                 | 10           |
| $u$ ( $\lambda = 780\text{m}\mu$ ) | —            | 0,623            | 0                   | 0,981        |
| $v$ ( $\lambda = 780\text{m}\mu$ ) | —            | 0,338            | 0                   | 0,445        |
| $u$ ( $\lambda = 500\text{m}\mu$ ) | —            | 0,003            | 0,069               | 0,115        |
| $v$ ( $\lambda = 500\text{m}\mu$ ) | —            | 0,342            | 0,750               | 0,453        |
| $u$ ( $\lambda = 380\text{m}\mu$ ) | —            | 0,256            | 0,450               | 0,372        |
| $v$ ( $\lambda = 380\text{m}\mu$ ) | —            | 0,011            | 0,500               | 0,015        |

On peut tirer de ce tableau plusieurs conclusions:

1. - La formule Judd (1944) est proche de la formule Judd (1935) mais simplifiée.
2. - La formule Judd (1944) est presque identique à la formule de Mac Adam qui est très simplifiée.
3. - La formule de Breckenridge et Schaub est nettement différente des trois autres.



Ces résultats conduisent à comparer uniquement la formule de Breckenridge et Schaub et celle de Mac Adam.

Le diagramme de Mac Adam présente l'avantage d'un triangle XYZ rectangle avec le sommet Z à l'origine des axes  $u, v$  (Fig. 2).

Le diagramme de Breckenridge et Schaub a l'intérêt d'avoir l'origine des coordonnées au point  $c$  et d'avoir une orientation du spectre dont la



FIG. 2

portion des grandes longueurs d'onde est parallèle à l'axe des coordonnées (Fig. 1).

Ces avantages du système de Breckenridge et Schaub ne sont d'ailleurs pas déterminants car M. Seve (8) a montré qu'une transformation simple du système Mac Adam permet de profiter des facilités données par les deux systèmes.

Le choix final a été dicté par la comparaison des longueurs de segments dans les diverses régions du spectre pour les diagrammes de la C.I.E., de Breckenridge et Schaub et de Mac-Adam à la lumière des résultats fournis par Wright (1).

Nous avons pris un segment de longueur 1 dans le violet et nous avons pu dresser le tableau ci-dessous:

|         | C. I. E. | Breck. & Sch. | Mac-Adam |
|---------|----------|---------------|----------|
| Vert    | 20       | 2,4           | 2,8      |
| Jaune   | 12,7     | 1,6           | 2,2      |
| Orange  | 10       | 2,4           | 3,1      |
| Rouge   | 3,6      | 2,4           | 3,1      |
| Pourpre | 10,9     | 3,2           | 3,7      |
| Violet  | 1        | 1             | 1        |
| Bleu    | 3,6      | 1,2           | 1,4      |

Le meilleur rapport 3,2/1 est obtenu avec Breckenridge & Schaub mais la meilleure répartition suivant les régions du spectre se trouve chez

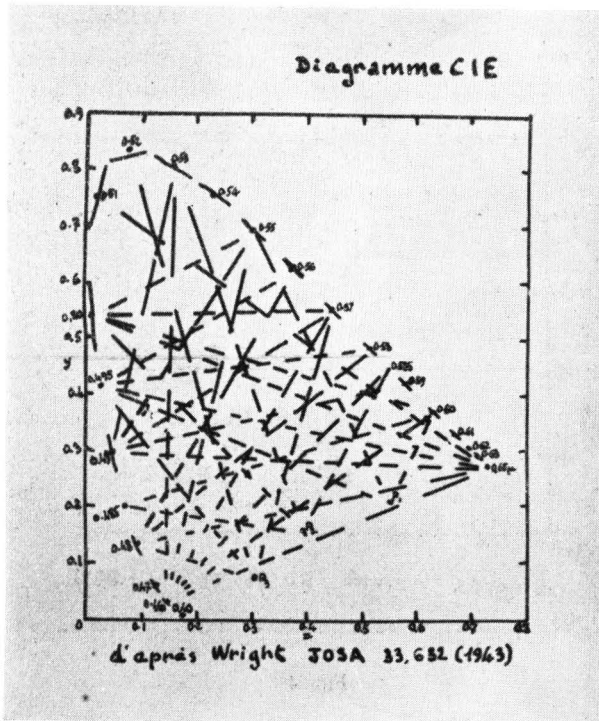
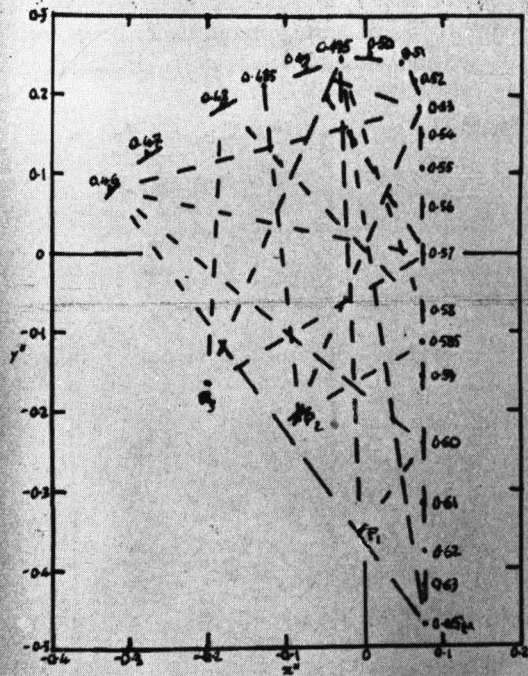


FIG. 3

Mac-Adam. Comme par ailleurs les équations de Mac-Adam sont plus simples on les préférera pour disposer d'une représentation plane à chromaticité presque uniforme facile à manier.

# Diagramme de Breckenridge et Schaub



d'après Wright 305A 33,632 (4983)

FIG. 4

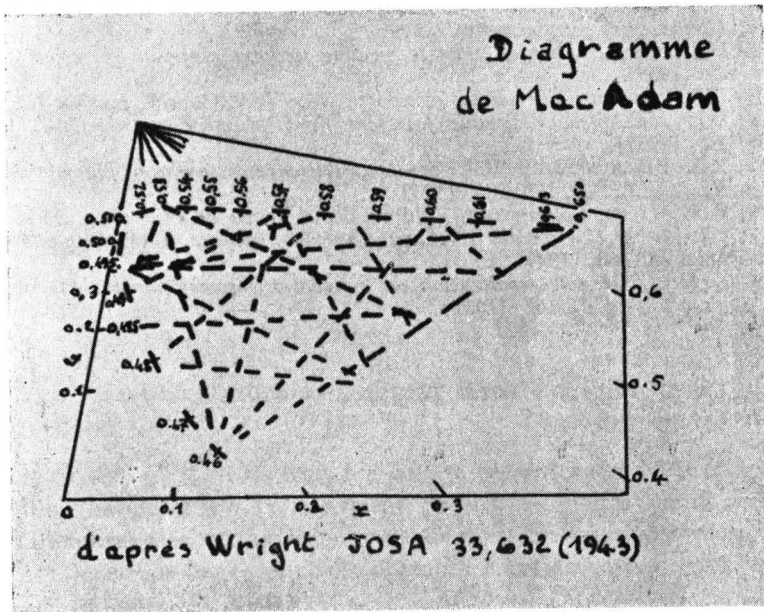


FIG. 5

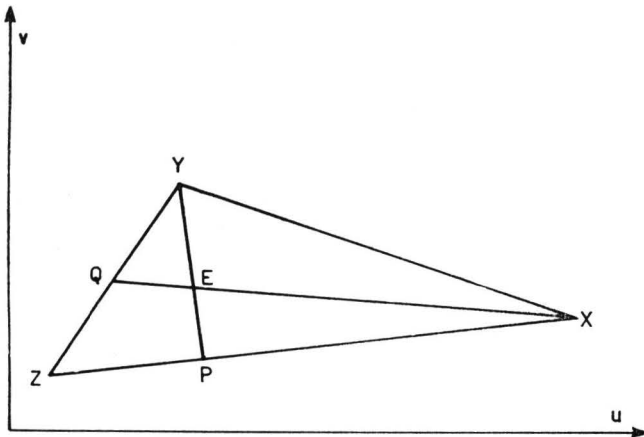


FIG. 6

## BIBLIOGRAPHIE

- (1) W.D. WRIGHT, *The graphical representation of small colour differences*, J.O.S.A., 33, 632, (1943).
- (2) D.B. JUDD, *A Maxwell triangle yielding uniform chromaticity scales*, J.O.S.A., 25, 24, 35, (1935).
- (3) D.B. JUDD, In « *The science of color* », New York, Crowell, pp. 301-312, (1953).
- (4) D.L. MACADAM, *Projective transformations of color specifications*, J.O.S.A., 27, 294, 299, (1937).
- (5) F.C. BRECKENRIDGE, W.R. SCHAUB, *Rectangular uniform chromaticity scale coordinates*, J.O.S.A., 29, 370-380, (1939).
- (6) F. BLOTTIAU, *Colorimétrie*, Editions de la Revue d'Optique pp. 95-96.
- (7) P.J. BOUMA, *Les couleurs et leur perception visuelle*, Bibliothèque Technique Philips Dunod, p. 268, (1949).
- (8) R. SEVE, *Sur une modification du système trichromatique de MACADAM*, Die Farbe, 10, nr. 1-4, pp.161-168, (1961).

# FACTEUR DE VIVACITE ET FACTEUR D'EFFICACITE D'UNE COULEUR

FRANÇOIS DRIANCOURT

Imprimerie Georges Lang - Paris

## **I - Rappel des anomalies constatées dans l'emploi des formules de vivacité.**

Les recherches, dont les résultats ont été présentés aux 5<sup>e</sup> et 6<sup>e</sup> Journées Internationales de la Couleur, avaient permis de mettre en évidence un certain nombre d'anomalies dans l'emploi des formules de vivacité. On rappelle brièvement les conclusions obtenues à cette occasion:

1) Il est indispensable d'effectuer les études de vivacité à longueur d'onde dominante constante, sous peine d'introduire dans les expériences des éléments difficilement contrôlables, liés à des facteurs psychologiques.

2) La formule proposée par M. Edelmann — parfaitement adaptée à l'étude d'échantillons d'une même encre, imprimée à charge croissante — peut se trouver en défaut quand on veut comparer des échantillons quelconques, même à longueur d'onde dominante constante.

3) Une formule plus simple, basée sur les notions subjectives de « puissance » et de « fraîcheur » d'un coloris, se trouve en bonne corrélation avec la formule de M. Edelmann, mais avec les mêmes limitations.

On s'est préoccupé, dans l'étude, qui va être commentée maintenant, de rechercher la cause des écarts signalés ci-dessus en 2) - en même temps qu'une formule utilisable dans le cas d'échantillons imprimés de longueur d'onde dominante constante, mais provenant d'encres quelconques.

## **II - Possibilités d'extension de la formule de vivacité simplifiée.**

### *II. 1 - Rappel de la formule proposée en 1962.*

On relève sur la courbe spectrophotométrique de l'échantillon:

- le facteur de réflexion maximum  $R_{\max}$ .
- le facteur de réflexion minimum  $R_{\min}$ .

les points caractéristiques en question correspondant en général à des inflexions du premier ordre de la courbe.

Le facteur de vivacité est alors calculé par la formule:

$$V = \log(1 - R_{\min}) - \log(1 - R_{\max}),$$

les termes  $(1 - R_{\min})$  et  $(1 - R_{\max})$  étant en relation avec les grandeurs subjectives respectivement intitulées « puissance » et « fraîcheur ».

On précise bien que cette formule n'est pas considérée comme parfaite, et qu'on l'a uniquement utilisée:

- 1) en raison de sa simplicité d'emploi;
- 2) pour étudier plus à fond la correspondance entre « vivacité » et forme des courbes spectrales.

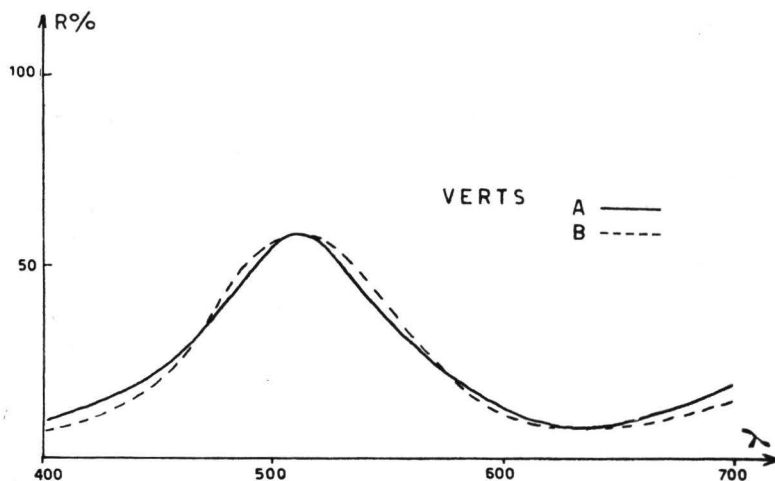


FIG. 1

## II. 2 - Comparaison de couleurs de même vivacité

1) La fig. 1 représente les courbes de réflexion de deux échantillons verts A et B, ayant même longueur d'onde dominante, et mêmes facteurs de réflexion extrêmes.

La comparaison visuelle montre que l'échantillon B est incontestablement plus vif, et fournit une sensation colorée beaucoup plus intense. Ceci est d'ailleurs conforme aux prévisions théoriques, la courbe B étant moins éloignée de celle d'une couleur caractéristique.

2) La fig. 2 représente les courbes de réflexion de deux échantillons analogues, mais de teinte magenta. Dans ce cas encore, le résultat est identique au précédent.

## II. 3 - Essais de différentes formules

1) La comparaison ci-dessus montre qu'une formule du type proposé n'est pas applicable telle que à l'étude d'échantillons quelconques.

2) La différence entre les deux courbes de la fig. 1 peut s'exprimer, en termes de colorimétrie trichromatique, par une différence entre les coordonnées Y.

3) Il semblait logique, dans ces conditions, de tenter une combinaison des deux termes « luminance » et « facteur de vivacité », ce dernier sous la forme citée en II. 1.

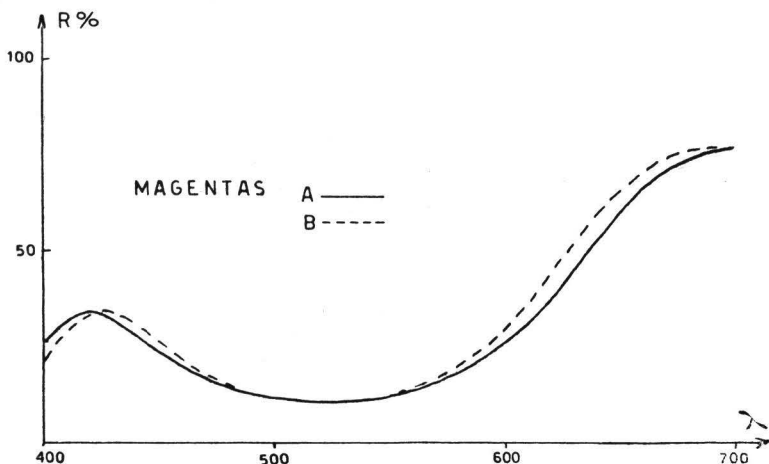


FIG. 2

On a expérimenté deux formules du type;

$$W_1 = V. Y,$$

$$\text{et } W_2 = V. \log. Y$$

La première expression est à rejeter, comme favorisant anormalement les échantillons à forte luminance.

La seconde donne des résultats meilleurs, en correspondance souvent acceptable avec les observations visuelles, mais *uniquement quand les courbes spectrophotométriques des échantillons ne sont pas trop différentes les unes des autres.*

On notera que cette restriction est identique à celle signalée en 1962 pour la formule de M. Edelman.



## II. 4 - Conclusion de la première série d'essais

Les résultats négatifs de ces premières expériences ont conduit à émettre l'hypothèse suivante:

Une formule de vivacité, valable pour l'étude d'échantillons d'une même encre, imprimée à charges croissantes, n'est en général pas valable pour la comparaison de deux échantillons provenant d'encres différentes.

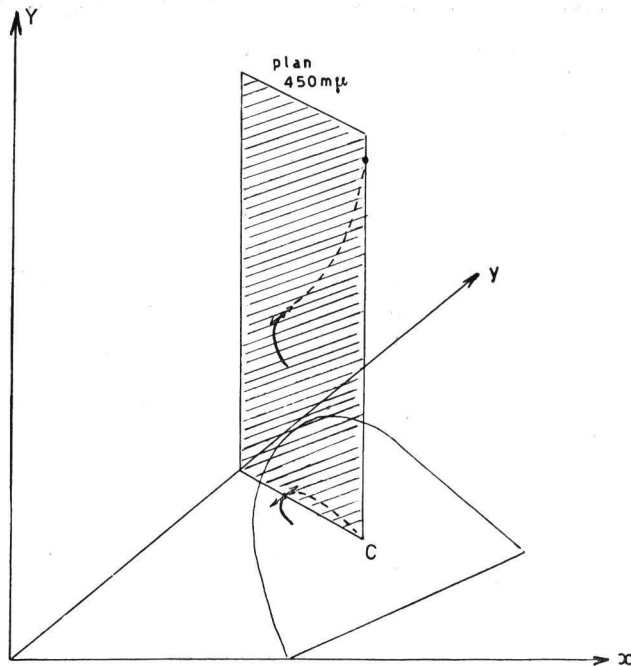


FIG. 3

Cette hypothèse s'appuyait sur la remarque suivante:

1) Les échantillons de même longueur d'onde dominante, mais d'origine quelconque, sont situés *dans un plan* de l'espace C.I.E.

2) Les échantillons d'une même encre, imprimée à charges croissantes, sont situés, dans le même espace, *sur une courbe gauche*, n'ayant que deux points communs avec le plan précédent.

La différence de nature physique entre les deux groupes d'échantillons, mise en évidence sur la fig. 3, fournit une première explication plausible des difficultés rencontrées.

On peut également citer, à l'appui de ladite hypothèse, la différence de nature entre les deux modes d'observation visuelle:

- dans le premier cas, examen d'un couple d'échantillons quelconques sans aucun étalon de comparaison;
- dans le second cas, choix d'un échantillon optimum dans une série homogène, ce choix étant guidé par la comparaison des échantillons extrêmes.

A ce point des recherches, on a alors considéré comme nécessaire d'entreprendre une étude systématique du phénomène de vivacité, à longueur d'onde dominante constante, et sur des échantillons d'origine absolument quelconque.

### **III - Etude d'échantillons quelconques, de longueur d'onde dominante constante.**

#### *III. 1 - Description des expériences*

Il était souhaitable de disposer, pour ces expériences, d'échantillons présentant des variations importantes, à la fois en saturation et en luminance. Cette considération nous a amenés à effectuer l'étude en question dans la région des verts.

Une très importante collection d'échantillons imprimés verts, obtenus soit à partir d'encres pures, soit de superpositions encre jaune + encre cyan, a été séparée en 5 groupes, de longueurs d'onde dominantes sinon identiques, du moins très voisines, à savoir:

- A) 495 - 498 millimicrons
- B) 500 - 504 millimicrons
- C) 506 - 509 millimicrons
- D) 512 - 516 millimicrons
- E) 520 - 525 millimicrons

On a sélectionné un nombre suffisant d'impressions pour pouvoir disposer, dans chaque groupe, d'au moins quelques échantillons ayant soit même luminance avec des saturations différentes, soit même saturation avec des luminances différentes. Les formules ne respectant pas ces classements sont, en effet, à considérer à priori comme aberrantes.

Les comparaisons visuelles ont été faites par paires, sur des échantillons de 2 x 2 cm, entourés d'un fond gris neutre de densité optique 0,35. Le niveau d'éclairément, sous illuminant C, était de l'ordre de 500 lux.

On rappelle à ce sujet que la luminance du fond, sur lequel sont présentés les échantillons, a une importance considérable sur le résultat des observations visuelles.

Un fond trop clair favorise les couleurs à forte luminance; un fond trop sombre favorise les couleurs à forte saturation.

### III. 2 - Formules étudiées

Une étude préalable a permis de retenir un certain nombre de formules, toutes basées sur la théorie des moments de Luther:

1) une représentation graphique, utilisée par l'Institut de Recherches allemand FOGRA

$$Y - X = f(Y - Z)$$

2) la formule proposée par M. F. Braun

$$V = \frac{M}{Mc}$$

$M$  représentant le moment de la couleur de l'échantillon, et  $Mc$  le moment de la couleur caractéristique de même longueur d'onde dominante.

3) une formule dérivée de la précédente, où le moment est remplacé par l'expression:

$$s(X + Y + Z)$$

$s$  représentant la saturation de l'échantillon - ou de la couleur caractéristique de même longueur d'onde dominante.

A un facteur près, constant pour une longueur d'onde donnée, cette formule donne des résultats identiques à la précédente.

4) la formule de base:

$V = \frac{p \cdot Y}{pc Yc}$ , où  $p$  représente la pureté colorimétrique et qui, à un facteur près, est également identique à la précédente (voir ci-dessous).

La comparaison a donc porté en fait sur les expressions 1) et 3), cette dernière ayant été retenue comme permettant des calculs faciles avec une bonne précision dans toute l'étendue du spectre, en particulier dans les violets (zone où le calcul de  $p$  est délicat).

### III. 3 - Equivalence des expressions $p \cdot Y$ et $s(X + Y + Z)$

soit:  $V_1 = p \cdot Y$

et  $V_2 = s(X + Y + Z)$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p}{s} \cdot \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{p}{s} \cdot y$$

Le calcul de la pureté colorimétrique peut se faire par la formule suivante:

$$p = \frac{y_s}{y} \cdot \frac{x - x_w}{x_s - x_w}$$



Cette approximation est sans doute responsable des écarts constatés par rapport au classement visuel (voir tableau ci-après en III. 4. 3).

2) On a reporté, sur la même figure, le long de deux axes arbitraires, approximativement parallèles à la ligne moyenne des couleurs précédentes, les valeurs:

$$E_1 = s(X + Y + Z)$$

et

$$E_2 = \frac{s(X + Y + Z)}{s_c(X_c + Y_c + Z_c)}$$

La première formule, qui ne tient pas compte des différences de longueur d'onde dominante, fait apparaître également quelques écarts par rapport au classement visuel.

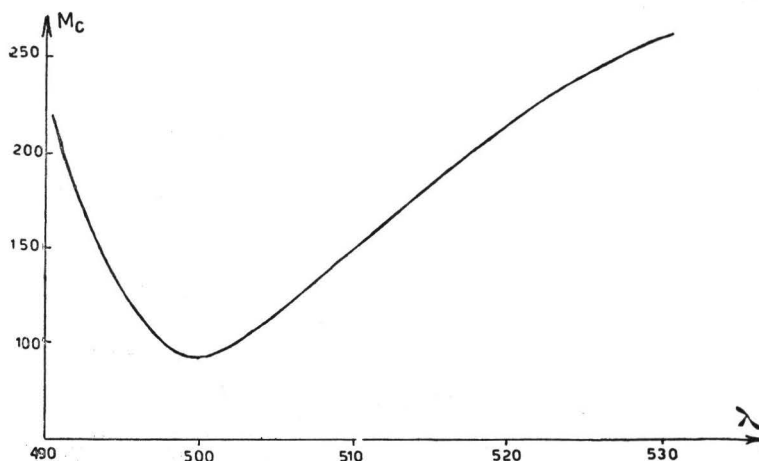


FIG. 5

La seconde, par contre, est *en parfait accord* avec celui-ci.

Les écarts entre les résultats des deux formules ci-dessus — même pour des échantillons ne présentant qu'une faible différence de teinte — font ressortir l'importance extrême qu'il y a travailler à longueur d'onde dominante constante.

La figure 5, qui représente la variation de  $M_c$  en fonction de la longueur d'onde, dans l'intervalle correspondant à nos expériences, illustre ce facteur.

3) Le tableau ci-dessous compare le classement visuel à ceux résultant des différentes formules. Les échantillons situés en haut de chaque colonne sont ceux considérés comme les plus « vifs ».

GROUPE B

| Classement<br>visuel<br>échantillon n. | Formule<br>1) | Formule<br>2)<br>$E_1$ | Formule<br>2')<br>$E_2$ | Edelmann |
|--|---------------|------------------------|-------------------------|----------|
| 43                                     | 43            | 43                     | 43                      | 41       |
| 41                                     | 41            | 41                     | 41                      | 43       |
| 45                                     | 18            | 40                     | 45                      | 40       |
| 40                                     | 40            | 45                     | 40                      | 42       |
| 42                                     | 26            | 42                     | 42                      | 26       |
| 18                                     | 45            | 18                     | 18                      | 45       |
| 26                                     | 42            | 26                     | 26                      | 39       |
| 39                                     | 25            | 39                     | 39                      | 18       |
| 25                                     | 39            | 25                     | 25                      | 25       |
| 10                                     | 10            | 10                     | 10                      | 10       |

4) Dans les autres groupes d'échantillons étudiés, la formule:

$$E_2 = \frac{S(X + Y + Z)}{S_c(X_c + Y_c + Z_c)}$$

a donné également des résultats en excellente concordance avec les observations visuelles. Sur la totalité des expériences, on n'a enregistré que trois écarts avec le classement visuel, vraisemblablement dûs à des facteurs de réflexion spéculaires trop différents.

#### IV - Conclusions.

Les expériences, qui viennent d'être rapportées, ne peuvent être considérées comme définitives: elles devront encore être complétées par des essais complémentaires dans d'autres zones de couleurs.

Elles permettent néanmoins de dégager deux conclusions provisoires; qui sont dès maintenant à prendre en considération dans toute étude concernant la « vivacité » d'un échantillon coloré:

1) Il convient de séparer nettement le problème de choix de l'échantillon de la vivacité maximum, dans une série d'impressions à charge croissante — et le problème de comparaison par paires d'échantillons quelconques de même longueur d'onde dominante.

On propose, pour bien marquer cette différence, d'adopter, dans le premier cas, le terme de:

*facteur de vivacité*

et dans le second cas, le terme de:

*facteur d'efficacité*

ce dernier terme correspondant à la notion exposée dans les travaux de Mac Adam sous le nom de « visual efficiency ».

2) L'étude du facteur d'efficacité semble pouvoir être effectuée à l'aide de formules basées sur la théorie des moments de Luther, en particulier celle proposée en III. 4. 4.

#### BIBLIOGRAPHIE

- D.L. MAC ADAM, J.O.S.A. 1935. 1) 25.249, *Theory of the maximum visual efficiency of colored materials*. 2) 25.361, *Maximum visual efficiency of colored materials*.
- E. EDELMANN, 2èmes Journées Internationales de la Couleur - 1958: *Méthodes colorimétriques de comparaison des impressions trichromes*.
- FR. BRAUN, 1) 4èmes Journées Internationales de la Couleur - 1960: *Contribution à l'étude sur la notion de vivacité de la couleur*. 2) *Contribution à l'étude du facteur de vivacité des encres d'impression* - 1960.
- F. DRIANCOURT, 1) 5èmes Journées Internationales de la Couleur - 1961: *Le facteur de vivacité: étude expérimentale de différentes formules*. 2) 6ème Journées Internationales de la Couleur - 1962: *Expériences nouvelles sur le facteur de vivacité*.

**SECTION II**  
**PROBLEMES DES MUSEES**

Sous la présidence de M. GERMAIN BAZIN (France)

*Président* de deux séances: M. DÉRIBÉRE (France)

*Pr-sident* de la séance tenue à Padoue: M. LOOSE (Belgique)





# ECLAIRAGE ET PROTECTION DES OEUVRES D'ART DANS LES MUSEES ET GALERIES D'ART

JACQUES HONNOREZ

Glaverbel - Bruxelles, Belgique

Au cours de la séance inaugurale de ce congrès, le président du C.I.C., M. le Professeur LE GRAND a longuement insisté sur la nécessité de protéger les objets colorés exposés dans les musées et galeries d'art contre les effets nocifs de la lumière.

Il faut reconnaître que les matériaux verriers disponibles jusqu'à ces dernières années ne permettaient pas de satisfaire pleinement au désir légitime des responsables des musées d'assurer, dans les meilleures conditions possibles, la conservation des objets d'art et documents exposés, tout en réalisant des présentations aussi parfaites que possible.

Je me félicite de l'occasion qui m'est donnée aujourd'hui de vous révéler l'existence de produits verriers tout à fait nouveaux qui apportent une solution originale et efficace au problème de l'éclairage naturel des musées et de la présentation des objets exposés:

- les uns éliminent les radiations ultra-violettes de la lumière naturelle tout en réduisant sensiblement l'apport d'énergie calorifique du rayonnement solaire,
- les autres sont des verres pratiquement sans reflets.

Ces produits sont obtenus par dépôts de couches diélectriques dont le mécanisme d'action est à base interférentielle.

Utilisées depuis quelques années dans des appareillages optiques tels que objectifs photographiques, filtres sélectifs, etc.... ils seront lancés sur le marché à la fin de cette année en grandes dimensions: 3,2 m x 4 m.

Nous en prévoyons dès à présent, un large champ d'utilisations dont certaines sont susceptibles de vous intéresser:

## **1 - Protections des objets colorés contre l'effet des rayons ultra-violettes contenus dans le spectre solaire.**

Les verres anti ultra-violet efficaces, utilisées le plus fréquemment, jusqu'ici présentaient, une coloration jaune plus ou moins marquée.

Au contraire, le verre à couches interférentielles anti U.V. présente une

courbe de transmission spectrale avec un seuil très abrupt au début des radiations visibles. C'est ainsi qu'il élimine par réflexion toute radiation de longueur d'onde inférieure à 380 m $\mu$  et qu'il présente déjà une transmission de 80% à 400 m $\mu$  et de 90% à 450 m $\mu$  (cf. fig. 1).

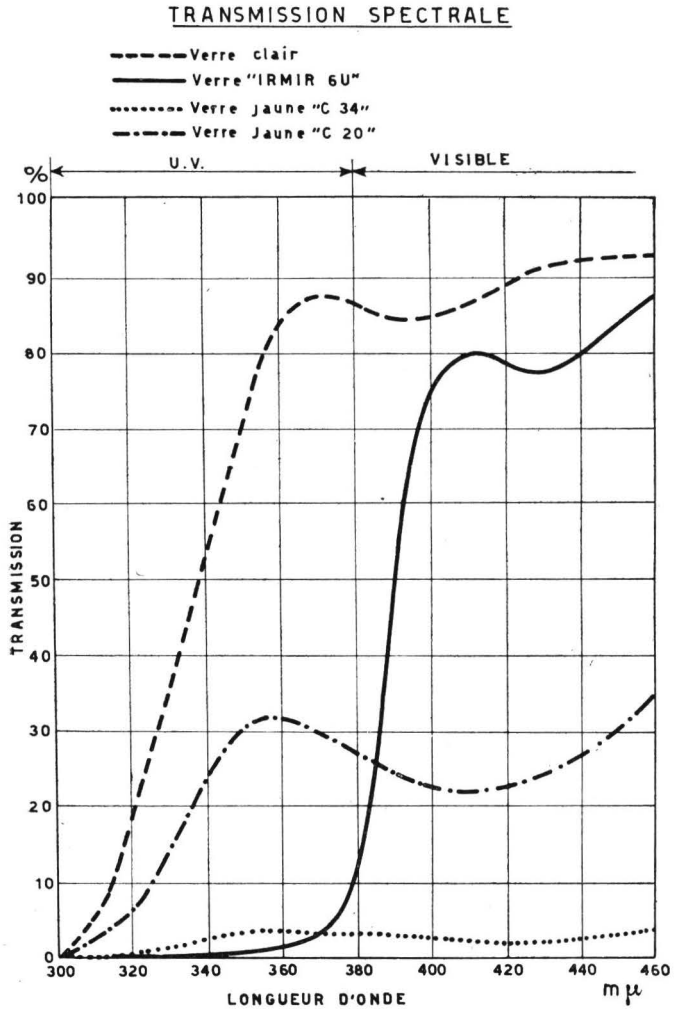


FIG. 1

Ce verre répond donc au triple but poursuivi:  
 — élimination des rayons ultra-violetes,  
 — absence de coloration,

— transmission maximum de la lumière visible, pratiquement égale à celle d'un verre ordinaire.

## 2) Protection contre l'apport d'énergie calorifique.

Cette propriété des verres à couches diélectriques qui n'est peut-être pas spécialement recherchée pour l'éclairage des musées n'est pas à dédaigner; aussi, nous croyons utile de mentionner que le verre anti U.V. dont nous venons de parler élimine également, par *réflexion*, une grande partie des rayons infra-rouges du spectre solaire (fig. 2). C'est d'ailleurs là une propriété qui le différencie le plus des autres verres inactiniques.

Nous insistons sur le fait que ces rayons infra-rouges sont réfléchis et non absorbés comme c'est le cas avec les verres athermanes qui présentent tous l'inconvénient de s'échauffer suite à l'absorption des rayons infra-rouges

### TRANSMISSION SPECTRALE

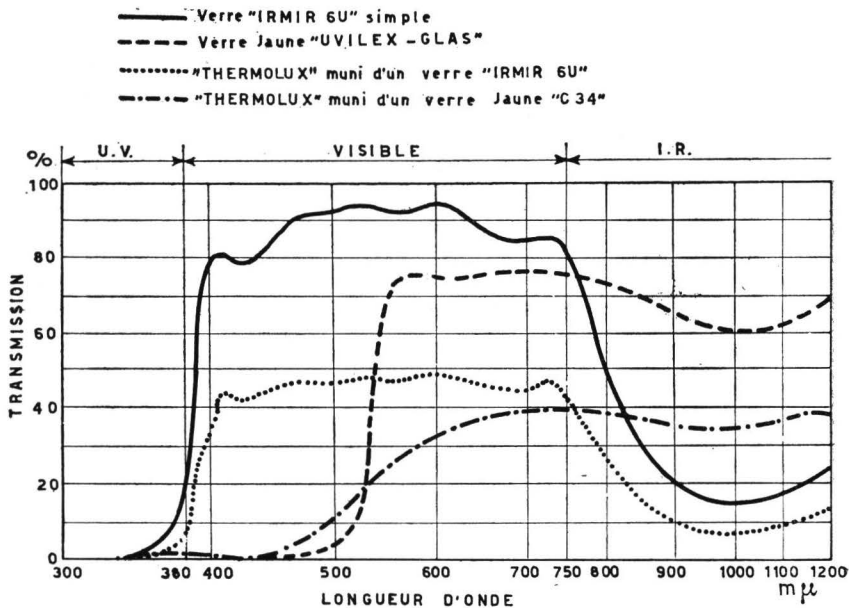


FIG. 2

et de rerayonner à l'intérieur des locaux une grande partie de l'énergie calorifique absorbée.

La réflexion des rayons I.R. a déjà pu être réalisée grâce à l'emploi de verres semi-réfléchissants à couches métalliques (couches d'or notamment)

mais ceux-ci ne transmettent que 40% environ de la lumière visible, tandis que le verre anti U.V. à couches diélectriques en laisse environ 90%, c'est-à-dire autant, voire même un peu plus que le verre ordinaire.

Signalons incidemment que ce verre peut être éventuellement incorporé dans un vitrage double du type Thermolux, ce qui permet d'obtenir, en outre, une excellente répartition de la lumière.

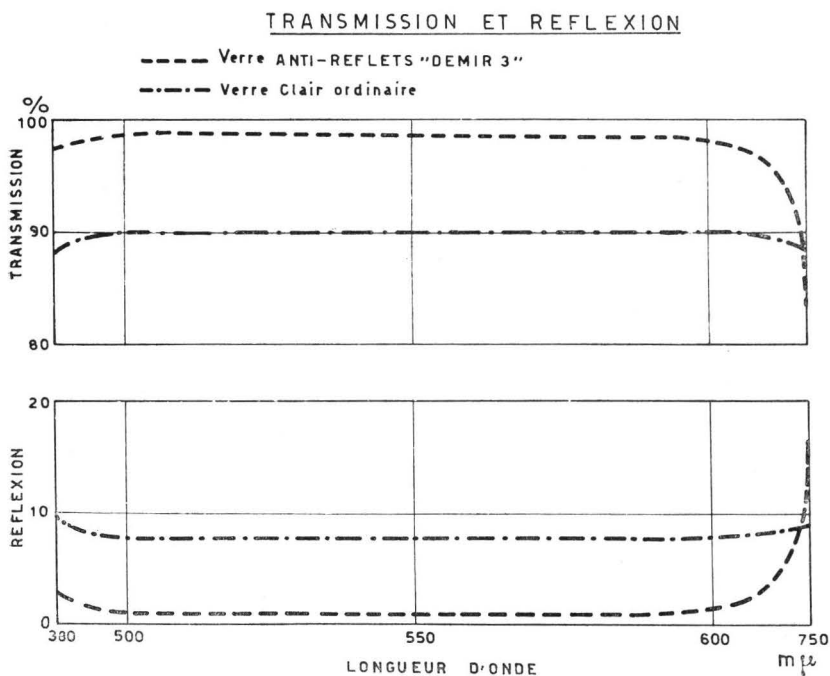


FIG. 3

### 3 - Amélioration de la présentation des objets et documents protégés par un vitrage.

Il est bien connu que la vision d'objets placés derrière un vitrage peut être fortement gênée par la réflexion de celui-ci.

Cet inconvénient sera pratiquement éliminé par l'emploi des verres antireflets à couches interférentielles qui réfléchissent moins de 1% de la lumière tombant sur la surface à incidence perpendiculaire alors qu'un verre ordinaire en réfléchit 8% (Fig. 3).

La transmission d'un tel verre est donc d'environ 98-99% dans l'ensemble du spectre visible contre 88 à 90% pour les verres ordinaires.

Cette propriété remarquable sera vraisemblablement largement exploitée par les décorateurs et étalagistes; elle trouvera également des domaines d'application dans la présentation des oeuvres d'art placées sous verres dans les vitrines d'exposition, etc...

Ajoutons également que ces verres permettent de résoudre le problème de l'élimination des réflexions parasites lors de la prise de photographies.

**4) D'autres applications,** de ces verres spéciaux sont aisément prévisibles; citons, par exemple, l'atténuation de l'apport calorifique des lampes survoltées qui rend délicate la photographie de certaines oeuvres d'art et documents supportant difficilement l'échauffement dû à celles-ci.

# VISION DES COULEURS

CHARLES GAMAIN

Constructeur Eclairagiste. Spécialisé Rayonnement - Paris

Avertissons de suite le lecteur qu'il ne s'agit ici, non d'une nouvelle étude sur ce difficile problème, ni d'une controverse sur les différentes théories et systèmes servant de base à l'*actuelle* (nous soulignons le terme) *colorimétrie*.

Nous avons le dessein de mettre en évidence des *réalités* dont, dans leur ardeur louable et remarquable, les spécialistes qui recherchent la solution poursuivie, n'ont pas toujours tenu compte.

Le vocable qui désigne ces spécialistes réputés, va nous faciliter l'exposé de notre point de vue, puisqu'il précise bien qu'il s'agit de *mesurer* la *couleur* dans le but de remplacer par des chiffres et méthodes, les définitions dérivant d'analogies naturelles ou d'appellations conventionnelles empiriques, ou obtenues également depuis un certain temps, à l'aide de la Cellule Photo-Electrique.

L'utilité, nous dirons même, *l'indispensabilité*, de cette mesure, est absolument incontestable si elle est obtenue, non seulement avec la précision scientifique et pratique qu'on recherche, mais reconnue et adoptée universellement comme le sont, ou vont le devenir, les autres « *Systèmes* ».

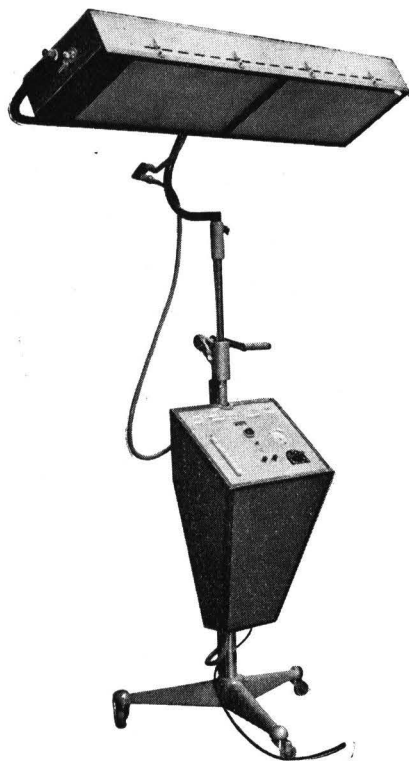
Sept Congrès Internationaux, dont le dernier qui vient de se tenir si magistralement à Florence, en faisant une fois de plus le point de la question, a fait ressortir la perfectibilité des moyens actuels, et la diversité des théories soumises aux compétences spécialisées.

Une constatation s'impose: d'une part il existe une « *Recherche pure* » dont la difficulté même a conduit ceux qui la poursuivent, à s'enfermer progressivement dans un domaine qui devient de plus en plus inaccessible à ceux qui, d'autre part, devraient bénéficier de leurs travaux.

En d'autres termes, pendant que s'élaborent une technique et système qui permettraient une définition universelle et chiffrée de toutes les teintes, les innombrables « *Usagers* » de la couleur, sont pour la plupart, toujours sous la dépendance de *l'appréciation visuelle*. Depuis quelque temps, cette appréciation peut s'aider d'instruments auxquels il n'est pas accordé, juste-

ment en raison de l'état actuel des connaissances et des travaux entrepris, la confiance qu'on doit attendre *d'une mesure*.

En résumé la situation est la suivante: d'un côté pour ceux qui créent la couleur, *des mesures référencielles*, d'un autre côté pour les utilisateurs *les appréciations visuelles*. Ces deux méthodes ne s'opposent pas, elles sont interdépendantes: des mesures et des appréciations visuelles pouvant intervenir dans les deux cas.



Générateur - Projecteur à 7 Températures Kelvin pour analyse, présentation et restaurations des Tableaux.

Qu'on nous permette toutefois cette observation dénuée d'originalité, mais d'une évidence qui a pourtant échappé à beaucoup; en *dernier ressort, c'est l'oeil qui juge la couleur*.

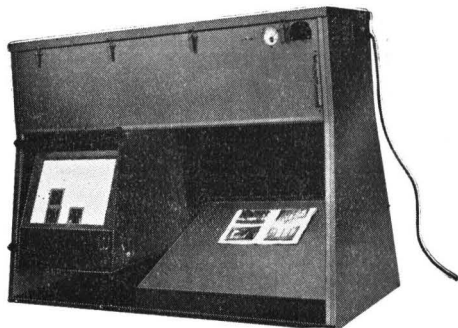
Cet organe, pour admirable qu'il soit, n'en possède pas moins des imperfections, et de nombreux mystères, particulièrement dans sa façon de nous transmettre ce phénomène qu'est pour nous la sensation des couleurs.



Ces particularités, comme toutes les fonctions biologiques, sont générales, mais avec des variations tenant aux êtres, aux conformations du sujet, à son âge, sexe et mode de vie.

La sensation de couleur, on le conçoit, est donc tout-à-fait *subjective*, alors que la *mesure*, elle, dépend d'éléments *physiques* plus ou moins reliés à nos réactions humaines de perception, mais absolument indépendante de toute influence physiologique. C'est là que surgit la différence essentielle qui est à l'origine des difficultés du problème.

En attendant sa solution, essayons d'aider, non pas ceux qui « *Recherchent* » mais ceux qui « *Utilisent* ».



*Générateur Mixte à 7 températures Kelvin automatique, pour examen simultané des originaux transparents et des Tirages opaques. Correction de l'aspect des épreuves.*

Ces derniers sont légion. Dans tous les domaines des connaissances et activités humaines, la couleur apparaît. Qu'il s'agisse de l'Art, de la Science, de l'Industrie, la Mode, les Arts-Graphiques, à un certain moment le praticien, l'artiste, veut et doit définir, choisir, comparer des couleurs, avant de les utiliser ou après les avoir employées: en un mot « *Les reconnaître* ».

Nous ne rappellerons pas le processus admis actuellement, et provisoirement du mécanisme de la perception des couleurs, on le connaît. Disons seulement qu'une couleur, pour nous, humains, *dépend essentiellement de la composition spectrale de la lumière qui l'éclaire*.

Au Congrès de l'Eclairage (I.C.I. 1931) des physiciens connus et éminents ont pu définir la nature physique de la lumière type, la plus favorable, qui est celle du *jour* naturel, d'un *certain jour* résultant de circonstances météorologiques définies, c'est-à-dire: Ciel bleu, côte nord, avec

nuages parsemés, en Avril ou Septembre, aux latitudes comprises entre 40 et 50° sans incidences dues à des obstacles colorés environnants).

Le système qui lui a donné ses coordonnées et qui pour le moment est encore en application, est dit « *Du triangle des couleurs* » trop connu pour que nous le décrivions.

Dans la pratique courante, et autant que faire se peut, par analogie avec les réactions des corps à la température, on a recours également à la similitude *apparente* de cette lumière « dite *blanche* » avec celle que le « Corps Noir » émettrait s'il était porté à la température absolue de 6.500 degrés. Ce moyen d'appréciation porte le nom de son auteur: le Physicien *Kelvin*; il n'est pas d'une rigueur vérifiable par les usagers, mais il suffit dans *l'actuelle pratique*.

Si cette lumière, dite Blanche, définie sur le triangle des couleurs par les coordonnées X, Y, Z, se situe au point 6.500°K de la courbe du corps noir, inscrite sur le même graphique, il était naturel, que pour les besoins courants, on cherchât à la reproduire.

Ce qui fut fait, et depuis près de 50 années, avec plus ou moins de bonheur, de nombreux réalisateurs obtiennent une précision satisfaisante, très acceptable, dans la majorité des cas.

Avec ces appareils, l'œil est mis dans les mêmes conditions *naturelles* auxquelles il est « *adapté* » pour la perception et la comparaison des nuances. En l'absence de *mesures*, c'est donc, pour la plus grande part des utilisateurs, la possibilité de repérer *visuellement* les couleurs sur échantillons.

Etait-ce suffisant?

Nous ne l'avons pas cru, et nos travaux sont partis de ce doute.

Quels sont-ils, et quels étaient nos buts à l'origine.

Les voici exposés, ceci étant notre contribution aux efforts communs présentés au *Congrès des 7ièmes Journées Internationales de la couleur* de Florence en 1963.

### **Communication:**

L'orientation de nos travaux a été motivée par les constatations suivantes: l'adoption de la Lumière Etalon, dite "Blanche" à 6.500 degrés Kelvin, répond au besoin de reproduire, en toutes circonstances, une lumière spectralement exacte et *stable* sous laquelle les couleurs, réagissant en conséquence, conserveront un aspect *constant*, pour *l'œil-moyen*.

Ce principe est valable *pour les créateurs de couleur*, et pour ceux qui *l'étudient*.

Il l'est moins pour ceux qui l'utilisent car les lumières, qui proviennent de sources naturelles ou artificielles multiples, présentent une grande

variété de compositions spectrales, faisant ainsi apparaître les nuances sous des aspects différents.

On constate également des phénomènes complexes se traduisant par des modifications de couleurs dues à la composition de certains colorants, modifiant leur réaction en fonction des longueurs d'ondes dominantes des lumières les éclairant (métamérisme).

En outre, des altérations du sens de perception chromatique, congénitales chez certains individus, ou résultant de leur âge, viennent modifier, pour eux, dans de grandes proportions, l'apparence d'une couleur établie sous une lumière donnée.



Eclairage Général des Grands espaces en *Lumière Naturelle Réconstituée et Variable*. Salon-Carré du Louvre (Au fond, la Grande Galerie éclairée par verrière: Les deux halls sont à des Températures différentes en relation avec les oeuvres présentées.

De plus, cette lumière étalon à  $6.500^{\circ}\text{K}$ , bien que de caractère international quant à sa création, n'est pourtant pas universellement adoptée.

C'est ainsi qu'aux U.S.A. on préfère la lumière du jour à  $7.200^{\circ}\text{K}$  dans la plupart des cas, et quelquefois  $3.500^{\circ}\text{K}$  pour des raisons particulières à certaines industries de ce pays.

En Angleterre, nombreux utilisateurs emploient des sources à  $8.500^{\circ}\text{K}$  ou même  $9.000^{\circ}\text{K}$ .

Plus encore, en France et dans plusieurs pays d'Europe, la photo-couleur, et les Arts Graphiques qui sont tenus par des considérations d'émulsions, des moyens habituels de prise-de-vues, des lampes spéciales du marché, emploient, de préférence, la température de  $4.500^{\circ}\text{K}$ .

Comme on le voit, cette question de lumière d'échantillonnage ou d'examen est extrêmement compliquée.

Enfin, l'utilisation pour le blanchiment, de sels fluorescents réagissant sous les U.V., apporte un élément nouveau dans l'appréciation visuelle des couleurs, rendues ainsi plus éclatantes.

Il en résulte l'obligation de disposer, incorporé ou isolé, d'un rayonnement U.V. provoquant la fluorescence.

Les constatations ci-dessus nous ont donc conduits à la conclusion d'apparence simpliste, mais pourtant logique: « *Qu'une seule source étalon dite lumière du jour n'est plus suffisante, et qu'il faut avoir la possibilité de reproduire avec précision, des lumières présentant des compositions spectrales définies pour des besoins définis* ».



Le terme « *Défini* » rappelant, non seulement, la spécification de besoin particuliers, mais aussi, et surtout, la précision dans la réalisation des dispositifs destinés à satisfaire à ces besoins.

Nous avons également tenu compte du fait que, si certains centres de recherche, ou industries, peuvent se procurer des appareils de mesures extrêmement coûteux, et actuellement valables — avec les réserves concernant généralement cette catégorie d'instruments — l'immense majorité de ceux qui en auraient besoin, ne peut ni se les procurer, en raison de leur prix extrêmement élevé, ni les employer faute de techniciens spécialisés dans leur manipulation, et l'utilisation pratique des renseignements que ces instruments fournissent.

Nous avons donc établi notre principe comme suit, en partant des considérations telles que:

- 1) Puisque, en définitive, c'est l'oeil qui perçoit, et juge, pour des raisons de métier, de sentiments, ou tout autre élément subjectif, nous devons mettre cet organe *dans les meilleures conditions possibles de fonctionnement.*
- 2) Puisque les couleurs sont obtenues, recherchées ou utilisées dans un nombre infini de circonstances, et que les différents utilisateurs ne sont, ni de même état physiologique, comportement, ni de conception identiques *nous leur proposerons un instrument recréant les éclairages imposés par des circonstances inhérentes aux travaux habituels qui leur sont propres.*
- 3) Puisque la lumière du jour est essentiellement variable, nous rendrons nos procédés capables de la reproduire avec les caractéristiques requises pour chaque qualité recherchée.
- 4) Comme ces variations doivent provenir, selon nos techniques actuelles, de sources lumineuses de composition spectrale différente, on conçoit que, seule, *une synthèse contrôlée de la lumière peut répondre à ces impératifs.*

C'est donc par une synthèse contrôlée de plusieurs sources, et le principe additif-soustractif appliqué à ces sources, que nous obtenons, non seulement les étalons respectifs adoptés par différents pays ou corporations, mais aussi la reproduction des lumières artificielles ou naturelles suivant les besoins.

Cet exposé voulant se tenir hors de la commercialité, ne décrira donc pas les appareils de notre conception. Mais nous tenons, toutefois, à en montrer, ci-après, les principales applications possibles.

# THE FUNDAMENTALS OF COLOUR RENDERING AND THEIR PARTICULAR APPLICATION TO THE LIGHTING OF PICTURE GALLERIES AND MUSEUMS

BRIAN H. CRAWFORD

National Physical Laboratory - Teddington, England

Colour rendering relates to the effect of a light source on the colour appearance of the objects which it illuminates. It is, therefore, a matter of prime importance in the display of pictures and other artistic objects. Nowadays, due especially to the invention of the fluorescent lamp, it is possible to have a variety of lamps which all appear to have the colour of, for instance, daylight, but which have quite different spectral compositions. The colour appearance of an object depends, in the main, upon three factors: the colour perception properties of the eye, the reflection and transmission characteristics of the object and the spectral composition of the light source. The first factor is variable, but, apart from colour blindness, only in a minor way within a fairly well-defined group; for the present purpose it may be taken to have a fixed average value. The second factor is a set of physical properties of the object, also fixed. It is the third factor which is the chief variable.

Consider a practical instance. A picture, or set of pictures, of the Impressionist school is to be viewed at night by artificial illumination. They were painted out of doors by daylight and so, presumably, should be viewed by an accurate imitation of daylight in order to present to the viewer a proper reproduction of the artist's intentions. The experience of the lamp manufacturers has shown that, while it is comparatively easy to produce lamps which have the exact colour of daylight, it is impossible to imitate precisely the spectral composition of daylight. The essential problem in colour rendering is, therefore, to determine, by appropriate experiment, how much the spectral composition of artificial daylight may differ from that of real daylight and yet be an acceptable imitation.

In some cases, the aim is the imitation of an illuminant other than daylight, for instance, the candlelight by which an altar piece was painted and is ritually viewed. Such an altar piece exhibited in a picture gallery or

museum could be illuminated by actual candles, but it would be much more convenient to use some form of electric lighting, in which case colour rendering would have to be considered. In general, colour rendering is concerned with the properties of an artificial illuminant which imitates some other illuminant, natural, artificial, or theoretical, the so-called reference illuminant. The solution of the problem of colour rendering means the determination of the tolerances within which the spectral composition of the artificial (or test) source must lie if it is to be an acceptable imitation of the target reference source.

There have been two main approaches to the solution of the problem of colour rendering specification, which may be briefly named for convenience the Colour Shift Method and the Spectral Band Method.

The principle of the colour shift method is to select a number of coloured surfaces, calculate their chromaticities for the standard illuminant (e. g. daylight) and for the test illuminant, make an allowance for chromatic adaptation if the two illuminants are of different colour and so deduce a colour shift for each coloured surface. The colour rendering properties of the test illuminant must then be deduced from the colour shifts. It is fairly obvious that the general colour rendering will be worse the larger the colour shifts. This is obviously a matter of considerable difficulty, since in real life colours stand in a complex relation one to another, the relation being of great psychological import, yet outside the scope of colorimetric specification. The only thing done so far has been to assume that the minimum perceptible colour steps of MacAdam or of Wright, or some multiple of them, are also applicable in the form of *UCS* or *RUCS* diagrams to the colour rendering case (Barnes, Kruithof and Ouweltjes). This is possible, but unlikely; to say the least, it should not be assumed until proved, which leaves the colour shift method deprived, for the present, of one of its most important ingredients, a scheme of tolerances.

The colour shift method must be kept in mind, however, if only because of the interesting fundamental developments partly worked out by Wyszecki (1). This concerns the selection of a set of test colours. Wyszecki suggests a method of doing this in a random manner so as to cover the whole of colour space without unfair bias in one part in relation to other parts. This random selection of a representative set of colours seems a logical necessity in any proposed colour shift method and if it could be combined with a practical system of tolerances, the problem of colour rendering specification might be solved in a very satisfactory manner. The availability of modern computer facilities are assumed.

While the colour shift method awaits further development, considerable progress has been made with the spectral band method. In particular, the determination of appropriate tolerances has been carried out for certain applications and these tolerances have been incorporated into a complete

system of assessment and specification of colour rendering. The essence of the spectral band method is to simplify the spectral power distribution curve by dividing the spectrum into a relatively small number of bands; various numbers of bands between five and eight have been proposed from time to time. The hope is that the powers, or weighted powers, in these bands will describe the quality of the light from the illuminant in sufficient detail to enable a reliable and unambiguous assessment of colour rendering to be made. Two steps have to be taken, firstly to determine the appropriate band divisions, secondly to determine the allowable tolerance on each band. It is convenient to adjust the band division so that all bands have equal weight from a colour rendering point of view, that is, equal tolerance. This may be achieved by a process of successive approximation.

It may be pointed out here that there is a fairly direct connection between the two methods of colour rendering assessment, colour shift and spectral band. The spectral bands may be regarded as being rather like idealised test colours, or, on the other hand, the test colours can be considered as having something of the nature of spectral bands. The tolerances determined for the spectral bands must be related in some way to the chromaticity shifts of the test colours, but the formal relationship has not yet been worked out.

Direct experimental work on the determination of tolerances for the spectral band method has been carried out by Sanders and by Crawford (2, 3, 4, 5, 6), the first using the criterion of preferred colour rendering, the latter of accurate colour rendering. While preferred colour rendering is undoubtedly of wide interest, accurate colour rendering is the aspect which is of interest in the present context of picture gallery and museum lighting. The experimental methods used by Crawford have been described in full in the references given. It is sufficient here to mention the following points. (a) The number of bands chosen for dividing the spectrum was six, the limits being adjusted by trial and error to give bands of equal weight from the colour rendering point of view, i.e. the band tolerances were all equal. (b) Tolerances were determined by observation of a series of pictures and objects chosen to cover all common cases, viz., the usual range of artists' and printers' pigments in a variety of pictorial compositions. (c) The technique of observation was carefully designed to simulate living under an illuminant for considerable periods (not the rapid sequential comparison of illuminants, which is not normally of interest in practice), judgements being made on the basis of memory of colour appearance by skilled, critical observers (better than 95 percent of the total population of all types of observer).

As a result of this work, the spectral band boundaries were found to be as follows, for equal tolerances in all bands:

400 - 455 - 510 - 540 - 590 - 620 - 760 nm.



The tolerance per band expressed in luminance was  $\pm 10$  percent. This applies to any single band, or to bands separated by not less than the width of another band, or to contiguous bands deviating in opposite directions. If, however, a pair of contiguous bands deviate in the same sense, the tolerance is  $\pm 5$  percent. With this knowledge it is possible to assess the colour rendering properties of a light source. The following table contains two examples to demonstrate the method of working and a simple way of deducing a single figure as a general assessment of the colour rendering properties of a light source. The first example is a fluorescent lamp of very good colour rendering, obtained at the sacrifice of some efficiency, the second is a high efficiency lamp of approximately the same colour, but with notably poorer colour rendering. Both are lamps of recent manufacture, in the correlated colour temperature group of 4000° K.

| Spectral band limits (nm) and number | Band luminance |                  | Ratio of luminances (test reference) | Deviations from unity              |     | Excesses outside tolerances |    |
|--------------------------------------|----------------|------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-----|-----------------------------|----|
|                                      | test source    | reference source |                                      | single band double bands (percent) |     |                             |    |
| 400-455 (I)                          | 0.431          | 0.382            | 1.13<br>(1.06)                       | +13                                | +6  | 3                           | 1  |
| 455-510 (II)                         | 7.37           | 7.51             | 0.98<br>(0.89)                       | -2                                 | -11 | 0                           | 6  |
| 510-540 (III)                        | 15.0           | 19.1             | 0.79<br>(0.94)                       | -21                                | -6  | 11                          | 1  |
| 540-590 (IV)                         | 48.8           | 44.8             | 1.09<br>(1.04)                       | +9                                 | +4  | 0                           | 0  |
| 590-620 (V)                          | 18.0           | 18.3             | 0.98<br>(1.01)                       | -2                                 | +1  | 0                           | 0  |
| 620-760 (VI)                         | 10.3           | 9.93             | 1.04                                 | +4                                 |     | 0                           |    |
| <i>Total excesses = 22</i>           |                |                  |                                      |                                    |     |                             |    |
| 400-455                              | 0.584          | 0.439            | 1.33<br>(1.03)                       | +33                                | +3  | 23                          | 0  |
| 455-510                              | 5.92           | 8.07             | 0.73<br>(0.68)                       | -27                                | -32 | 17                          | 27 |
| 510-540                              | 12.5           | 19.8             | 0.63<br>(0.93)                       | -37                                | -7  | 27                          | 2  |
| 540-590                              | 55.0           | 44.7             | 1.23<br>(1.18)                       | +23                                | +18 | 13                          | 13 |
| 590-620                              | 19.8           | 17.6             | 1.13<br>(0.90)                       | +13                                | -10 | 3                           | 5  |
| 620-760                              | 6.21           | 9.35             | 0.66                                 | -34                                |     | 24                          |    |

*Total excesses = 154*

Although the total excesses figure gives a general classification of the colour rendering quality of a lamp, it is more informative to plot the spectral

band ratios on a diagram, as in the Figure, against the band number. An ideal lamp would plot as a horizontal line through band ratio unity. The tolerances may also be shown on the diagram, horizontal lines above and below the ideal line, at values 1.10, 1.05, 0.95 and 0.90. It may thus be seen at a glance exactly where and how the lamp deviates from the ideal and whether the deviations are outside the tolerances.

A third curve is also shown on the diagram which is of special interest. It results from a mixture of light blue fluorescent with tungsten filament lamps and gives almost perfect colour rendering. Being a mixture of two

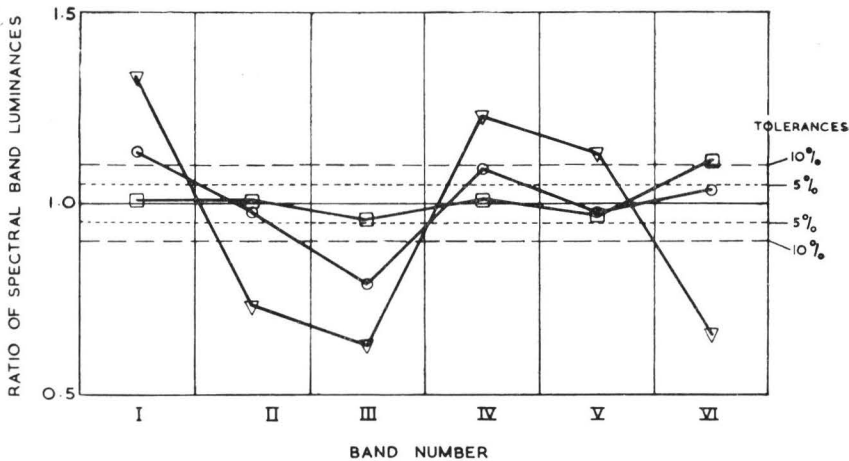


FIG. 1

different types of lamp it would not, perhaps, be suitable for the lighting of the whole of a picture gallery, but it might be appropriate for situations demanding the highest possible quality, such as inspection rooms where pictures are critically judged from either an aesthetic or a technical viewpoint.

The choice of lamps for the illumination of a picture gallery or a museum will be the result of taking many different factors into account, such as intensity from the point of view of conservation, colour in relation to daylight where the lighting is supplementary to daylight, etc., but in all cases, as this brief account shows, the installation can be assessed as regards its colour rendering. It is no part of this paper to produce a colour rendering survey of available light sources, but such a survey has been carried out, in fact, on a small scale for those lamps available on the British market. A wider survey could be very useful to the users of lamps, though possibly unpopular with the makers of lamps.

## REFERENCES

- (1) G. WYSZECKI, *The specification of the colour rendering properties of light sources*. Comptes Rendus, Com. Int. de l'Eclairage, Bruxelles, 1959, pp. 146-154.
- (2) C.L. SANDERS, *Color preferences for natural objects*. « Illuminating Engineering », 54 (1959), pp. 452-456.
- (3) C.L. SANDERS, *Assessment of color rendition under an illuminant using color tolerance for natural objects*. « Illuminating Engineering », 54, (1959), pp. 640-646.
- (4) B.H. CRAWFORD, *Measurement of colour rendering tolerances*. « J. Opt. Soc. Amer. », 49, (1959), pp. 1147-1156.
- (5) B.H. CRAWFORD, *Colour rendition and museum lighting*. « Studies in Conservation », 5, (1960), pp. 41-51.
- (6) B.H. CRAWFORD and D.A. PALMER, *Further investigations of colour rendering and the classification of light sources*. « Studies in Conservation », 6, (1961), pp. 71-82.

# ZUM BELEUCHTUNGSPROBLEM VON MUSEEN UND RESTAURIERATELIERS

KURT WEHLTE

Leiter des Instituts für Technologie der Malerei - Stuttgart, Deutschland

Es handelt sich bei diesem Referat hauptsächlich um das Problem der Farbenwiedergabe bei ausschließlicher oder zusätzlicher Benutzung künstlicher Lichtquellen in Gemäldegalerien und Restaurierateliers.

Was hier vorgetragen werden soll, ist nicht neu. Vielleicht sind aber in nächster Zukunft einige Fortschritte zu erwarten. Das Problem soll an Hand einiger optischer Experimente im wahrsten Sinne des Wortes « beleuchtet » werden. Als Farbskala benutzen wir nicht die in einem deutschen Normblattentwurf empfohlenen Testfarben sondern Farben des kleinsten, gleichabständigen Farbkreises mit den drei Grundfarben: Gelb, Magenta, Cyanblau und den drei Mischfarben erster Ordnung: Orangerot, Blauviolett, Grün, also die gleichen Farbtöne, welche heute in der Farbfotografie als Testfarben benutzt werden. Entscheidend dafür ist, daß jeder, der mit Farben zu tun hat, diese Farben genau kennt und in Erinnerung hat; er « weiß » sie. Außerdem benutzen wir eine Grauskala mit Titanweiss und 5 Graustufen: 1,5 - 5,5 nach DIN 6164. Aus diesen Farbtönen lassen sich bekanntlich substraktiv oder additiv alle anderen Farbnuancen ableiten, welche das menschliche Auge zu unterscheiden vermag. Die Stellen, wo die Farbtöne auf dem Spektralfarbenzug im CIE -Dreieck liegen, sind bekannt. Als Normlicht für den Betrachter gilt die Beleuchtungsart C. In der Praxis wird gewöhnlich eine Xenon-Lampe benutzt, deren Farbtemperatur 500° - 700° K unter der Normlichtart liegt und in diesem Bereich praktisch der Beleuchtungsart C genügend nahekommt. (An einigen Diapositiven werden farbige Beispiele gezeigt und einige Kurven hierzu). Mit einem improvisierten Beleuchtungskasten wird die genannte Testfarbenskala bei drei Arten von Leuchtstoffröhrenlicht, Glühlampenlicht, Jod-Wolframlicht und Quecksilberdampflicht vergleichsweise vorgeführt, außerdem eine Kombination von drei Arten von Leuchtstofflampen als bewährte Beleuchtung für Museen und Restaurierateliers. In Deutschland ist die Wahl der Röhrenlichtart noch sehr unterschiedlich und nirgends ganz befriedigend, weil man nicht oder nicht richtig mischt. An mehreren Bild-Beispielen

wird demonstriert, daß man italienische Meister des Trecento, frühe Deutsche, Niederländer der Barockzeit und moderne, internationale Kunst nicht in der gleichen Lichtart zeigen kann, sondern man muß mit den verschiedenen Lichtarten variieren. Farblichtbilder über spektrale Energieverteilung bieten einen Überblick über die vorhandenen Möglichkeiten, wobei man versuchen muß, Spitzen im Blau, Gelb und Gelbgrün zurückzuhalten.

Nachdem es neuerdings gelingt, Jod-Wolframlampen von  $3200^{\circ}$  K von bedeutend höherer Lebensdauer herzustellen und neuartige « Xenon-Langbogenlampen » von  $5800^{\circ}$  K und einer Lebensdauer über 3000 h, werden damit vielleicht künftig neue Wege auch für eine befriedigende Beleuchtung in Museums- und Restaurierräumen erschlossen.

Berechtigte Bedenken bestehen wegen nicht unerheblicher UV-Anteile im Xenonlicht. Diese lassen sich jedoch wegfiltern. Es würde sich jedenfalls lohnen, durch praktische Versuche die Eignung der neuesten Xenonlampen in der Museumspraxis zu überprüfen.

# QUELQUES IDEES RELATIVES A L'ECLAIRAGE ARTIFICIEL DANS LES MUSEES D'HISTOIRE NATURELLE

GEORGES BRESSE

Inspecteur Général des Musées d'Histoire Naturelle - France

Depuis un certain nombre d'années un effort est fait, dans tous les pays (1) pour donner aux collections, qu'elles appartiennent à la section des Beaux Arts ou à celles des Sciences, et ceci sans leur faire perdre leur caractère scientifique de documents, une présentation qui réponde aux tendances, et aux exigences, de la muséologie moderne. Autrement dit, on s'attache à la réalisation de présentations de caractère à la fois éducatif et esthétique, telles qu'elles exercent sur le visiteur un réel attrait, tout en l'instruisant, et dont l'aspect contraste avec celui, souvent rebutant, des anciennes accumulations d'objets dans des vitrines de forme et de proportions peu favorables, toujours mal éclairées.

On comprend combien de préoccupations doivent présider aux entreprises de ce genre. Parmi les problèmes à résoudre celui de l'éclairage n'est pas le moins important et, s'il n'est pas, en fait, plus difficile à résoudre que beaucoup d'autres, du moins est-il celui dont les solutions restent le plus souvent empiriques, parce qu'il commence seulement à être étudié d'une façon absolument systématique sur le *plan pratique*.

Je me bornerai ici à faire quelques réflexions sur les seuls musées d'Histoire Naturelle.

## **Eclairage naturel et éclairage artificiel.**

Pourquoi employer l'éclairage artificiel dans les musées d'Histoire Naturelle? On pourrait penser que, dans la construction ou l'aménagement d'un Musée d'Histoire Naturelle, il soit tout indiqué de n'employer — en dehors des heures d'obscurité —, que la lumière naturelle, en prévoyant des

(1) Comme en témoigne la création du Conseil International des Musées (I.C.O.M.), ses travaux et ses congrès qui ont lieu tous les trois ans.

fenêtres assez grandes ou mieux encore des verrières. Pour différentes raisons cette solution n'est pas bonne.

D'abord il ne faut pas perdre de vue que la lumière solaire, dont on ne soupçonne pas l'intensité réelle, est, du fait de cette intensité, de beaucoup la plus néfaste, altérant rapidement les couleurs de nombreuses pièces de collections, comme celles des Oiseaux, de certains surtout, ou des Insectes. Et ceci est un défaut grave. Du point de vue de la richesse en rayons ultra-violet (les plus dangereux à intensité égale sont ceux de plus petites longueurs d'onde), la lumière naturelle est assez comparable à la lumière émise par certains tubes fluorescents (et beaucoup plus riches en ultra-violet que les lampes à incandescence) (2). Certes, le verre à vitre, interposé entre les rayons solaires et les pièces de collections, absorbe une partie des rayons nocifs, mais il y a toujours le facteur intensité des radiations qui intervient.

Or, pour obtenir le même effet visuel, il n'est pas nécessaire avec l'éclairage électrique d'atteindre, dans une vitrine par exemple, une intensité lumineuse, ou, si l'on veut, une quantité de lumière, aussi grande. Car l'impression produite est tout-à-fait relative: dans la pénombre d'une salle, sans concurrence de la lumière extérieure, la luminosité des objets apparaîtra très grande avec une intensité lumineuse beaucoup plus faible. Inversement chacun a pu remarquer que les objets (vitrines murales ou tableaux, par exemple), placés entre deux fenêtres bien éclairés, sont très mal vus.

En outre, l'éclairage par la lumière naturelle dure autant que le jour, tandis qu'avec la lumière électrique on dispose de la faculté de réduire à volonté la durée: il est facile de n'éclairer les vitrines que d'une façon intermittente, soit en éclairant seulement aux heures d'ouverture du musée, soit même en employant des minuteries. On obtient ainsi avec l'éclairage électrique une conservation beaucoup plus longue des couleurs réelles des pièces de collections.

Enfin, on peut, dans chaque cas particulier, choisir l'intensité de la source lumineuse (c'est à dire la puissance des lampes électriques), la distance de la source lumineuse à l'objet, l'incidence dans laquelle les rayons lumineux l'éclairent, employer l'éclairage direct ou quand on le peut l'éclairage indirect, beaucoup moins nocif.

L'éclairage naturel par des verrières, qui est sans doute souhaitable pour les musées de peinture, n'offre aucun intérêt pour les musées d'Histoire Naturelle, tout en présentant de nombreux inconvénients: nettoyage et entretien (ferrures et masticage) toujours difficiles et coûteux, fragilité aussi (des orages de grêles ont parfois causé de très importants dégâts

(2) Voir utilisation des lampes dans les musées (Publication de l'I.C.O.M. - 1953).

dans les musées). Il est vrai qu'on fabrique maintenant des « verrières » en matières plastiques transparentes ou translucides qui ne présentent aucun de ces défauts tout en assurant une meilleure isolation thermique. De toute façon, elles ne peuvent guère être intéressantes pour nos musées scientifiques. Quant à l'éclairage naturel par des fenêtres nous avons dit qu'il devait être toujours modéré, pour éviter l'altération des nombreuses pièces de collections. Les fenêtres présentent en outre cet inconvénient, très réel pour nos musées, toujours trop exigus, de prendre beaucoup de surface murale. Elles présentent l'inconvénient, signalé, de l'éblouissement pour l'observation des vitrines situées entre deux fenêtres, et celui d'inciter les visiteurs à contempler le paysage ou le mouvement de la rue, au lieu de regarder les collections.

Doit-on par conséquent, proscrire totalement la lumière solaire des salles de musées? Je ne pense pas que cela soit opportun. Il s'agit surtout d'une question de goût, mais il me semble qu'un séjour prolongé dans des locaux complètement privés de lumière naturelle, c'est à dire dans des musées dont toutes les salles seraient aveugles, peut être assez pénible, on tout-au-moins lassant, et manquer de charme. Sans écarter totalement la solution de présentations dans des salles entièrement privées de lumière solaire, je recommande en général des salles éclairées d'une façon très modérée, mais possédant tout de même quelques ouvertures vers l'extérieur. Dans le cas de nouvelles constructions ou si l'aménagement d'anciens bâtiments le permet, on comprend qu'on peut, si l'on adopte cette façon de voir, imaginer toutes sortes de combinaisons ingénieuses de l'éclairage naturel avec l'éclairage électrique.

### **Eclairage d'ambiance et éclairage individuel des vitrines.**

De toute façon, que la salle soit plus ou moins éclairée par le soleil ou aveugle, elle devra, pour les jours sombres et les heures nocturnes, posséder un éclairage d'ambiance modéré et même faible, solution que je préfère à l'absence totale d'éclairage d'ambiance avec seulement éclairage individuel des vitrines. Cet éclairage d'ambiance ne pose pas de problèmes. On peut même, afin de provoquer une altération moindre des couleurs des objets, adopter l'éclairage indirect.

Dans tous les cas, l'éclairage individuel des vitrines s'impose. Il faut donc prévoir, dans la construction des vitrines, leur équipement électrique. En effet, la vitrine lumineuse, tranchant sur le pourtour très peu éclairé, concentre l'attention sur son contenu ainsi mis en valeur et l'effet esthétique produit par les objets est considérablement amélioré. Cet effet, d'ordre psychologique, est comparable à celui produit par le cadre pour la mise en valeur d'un tableau, ou encore à l'effet produit par la projection en salle obscure d'une photographie en couleurs. Chacun a pu remarquer qu'ainsi,



un paysage ou une fleur par exemple, apparaît à nos yeux plus beau qu'ils nous est apparu dans la nature, baigné de toute part par la lumière solaire. L'éclairage individuel isole, concentre, et rend précieux.

### **Différents modes d'éclairage des vitrines.**

Cet éclairage peut être réalisé de différentes façons selon le contenu des vitrines et surtout la disposition des pièces de collections à leur intérieur (seront-elles placées les unes en-dessous des autres, ou alternées selon des lignes verticales différentes, seront-elles fixées par des supports sur le fond de la vitrine ou bien reposeront-elles sur des étagères superposées? Celles-ci seront-elles en bois ou en verre?). Dans chaque cas une étude est à faire. L'éclairage peut venir d'en haut, les lampes étant placées à l'extérieur, au-dessus de la vitrine, dont le plafond est un verre translucide ou une plaque matière plastique. Les appareils d'éclairage pourront ainsi être facilement dissimulés derrière un fronton. C'est la disposition la plus favorable à l'élimination des rayons nocifs (rayons ultra-violet de faible longueur d'onde). Ou, si les lampes tubulaires doivent se trouver à l'intérieur des vitrines, on peut les placer horizontalement dans la partie haute ou dans la partie basse, ou verticalement sur les côtés. De toute façon, il est absolument indispensable pour éviter l'éblouissement que ces lampes soient invisibles pour le spectateur, c'est à dire cachées derrière des montants suffisamment larges.

Voilà problème élémentaire que chacun résout « au petit bonheur », avec les moyens du bord, qui, à mon avis demanderait une étude systématique sérieuse, aboutissant à des conclusions pratiques. Je veux dire par là que la construction d'une vitrine ne devrait jamais être envisagée sans tenir compte de son éclairage et qu'il devrait exister des types, bien étudiés, d'équipement électriques.

### **La lumière fluorescente et ses possibilités.**

Mais beaucoup d'autres facteurs sont à envisager, et d'abord la question préalable de la nature de la lumière électrique: incandescente ou fluorescente.

La lumière fluorescente possède sur l'incandescente l'avantage de ne pas chauffer l'intérieur de la vitrine, la chaleur ainsi dégagée pouvant endommager certaines pièces de collections. Sans doute contient-elle plus de rayons ultra-violet, mais on peut diminuer considérablement leurs effets par le choix d'une intensité relativement faible et l'intermittence de l'éclairage.

En définitive elle est moins nocive que l'éclairage solaire et la preuve en est donnée par les collections d'oiseaux ou de papillons, entièrement décolorés au bout de quelques années d'exposition à la lumière naturelle, même en l'absence de rayons directs du soleil.

En outre toutes sortes de précautions, qu'on trouvera rapidement signalées dans la publication citée de l'I.C.O.M., permettent d'atténuer les effets nocifs des ultra-violets, en particulier l'emploi d'écrans ou le revêtement des lampes tubes par un vernis plastique spécial faisant barrage aux ultra-violets.

La lumière fluorescente donne un éclairage régulier à peu près sans ombre, ce qui permet de distinguer nettement toutes les parties des objets exposés. Cette absence d'ombre peut être un défaut dans certains cas, du point de vue de l'aspect plastique: une statue blanche par exemple peut perdre beaucoup de son modelé lorsqu'elle est éclairée de tous côtés. Il peut en être de même pour certaines pièces d'Histoire Naturelle.

Certaines qualités de la lumière fluorescente sont à envisager et tout d'abord sa couleur, car, même sans faire appel aux lumières colorées, il y a toute une gamme dans la lumière blanche. Il semble, a priori que, dans la plupart des cas, pour un musée de zoologie par exemple, l'éclairage le plus satisfaisant sera celui qui imite le mieux l'éclairage dans la nature. A ce sujet, et, d'une façon générale pour toutes les considérations sur la qualité de la lumière, les établissements *mazda*, qui possèdent une remarquable installation de démonstrations, peuvent fournir toute une gamme de lampes tubulaires donnant des lumières blanches variées: blanc Super, « lumière du jour de luxe », « blanc brillant de luxe », « blanc soleil de luxe ». Ainsi la même scène peut nous donner l'illusion d'être vue dans la lumière naturelle, en pleine journée ou au soleil couchant. Nous disposons donc d'un choix intéressant.

### **Lumières colorées. Dans certains cas il peut y avoir avantage à employer des lumières colorées.**

Je signalerai par exemple celui du Muséum de Besançon où les oiseaux de la région ont été récemment présentés, non en véritables dioramas, mais dans des compositions où sont rappelées, à l'aide de matériaux naturels, les caractères des différents milieux qu'habitent les différentes espèces, des paysages appropriés ayant été peints sur le fond des vitrines d'une façon très artistique et volontairement très sobre. Bien entendu chaque vitrine est équipée électriquement. Pour celle des Rapaces Nocturnes, on a pensé à un éclairage bleuté, imitant l'éclairage lunaire, qui est pour ces animaux l'éclairage naturel: mais une objection s'est présentée: scientifiquement (examen des espèces) cela serait gênant, car lorsqu'on étudie un oiseau, même nocturne, on le regarde à la lumière solaire ou à la lumière électrique du laboratoire, et non à la lumière de la nuit qui est celle sous laquelle il a son activité. La solution, pour concilier l'évocation de l'éclairage naturel du biotype et l'examen des détails morphologiques, serait donc d'éclairer la vitrine-diorama avec une lumière-bleutée, et de placer à côté d'elles les mêmes pièces, c'est-à-dire les mêmes espèces, sans aucun rappel du biotype,

dans une vitrine éclairée en lumière blanche. Nous voyons par cet exemple que, dans certains cas, il peut être intéressant, pour obtenir plus de vérité dans nos présentations qui se veulent vivantes, d'envisager l'emploi de lumières colorées, indépendamment même de la recherche d'un effet spectaculaire.

En ce qui concerne l'effet spectaculaire, étranger à toute considération scientifique, on peut citer quelques essais: celui, par exemple, du British Museum Natural History de Londres: une petite vitrine, dont la glace est circulaire, est réservée à un groupe de Colibris (Oiseaux Mouches) choisis parmi les plus magnifiques de couleurs. Ces véritables bijoux sont éclairés successivement par des lumières différemment colorées et offrent ainsi, chaque fois, un spectacle nouveau.

Je rappellerai aussi, en passant, l'éclairage, bien connu, par la lumière de Wood de certains minéraux (fluorescents) qui prennent sous cette lumière noire, des teintes admirables. On peut en voir une belle collection au museum de Lyon.

### **Les projecteurs.**

Il est évident que si, dans le cas le plus général, il s'agit d'observer des objets dans des vitrines éclairées individuellement, il se présente aussi d'autres cas, demandant, par exemple, l'emploi de projecteurs pour attirer l'attention tout spécialement sur une pièce rare, ou faire ressortir un certain modelé, ou encore, tout simplement, pour obtenir un effet spectaculaire qui, s'il est tout à fait indépendant des préoccupations scientifiques, ne s'y oppose aucunement. Un essai de ce genre a été fait au musée de Saint Etienne. Cet établissement possédait un squelette d'Eléphant qui se trouvait à côté de Mammifères naturalisées. A l'occasion de la rénovation du musée, on a fait à ce squelette l'honneur d'occuper seul le centre d'une salle spéciale. Celle-ci a été peinte entièrement (plafond compris) en bleu nuit et un projecteur (lumière incandescente) convenablement placé l'éclaire d'une façon assez étrange, faisant ressortir les os de couleur ivoire sur le fond bleu sombre. Des vitrines murales encastrées (peintes entièrement en bleu nuit) occupent deux des murs de la salle et on y a rassemblé en une modeste collection les autres pièces d'ostéologie trouvées dans le musée. Cette collection, du fait de la couleur des murs et d'un éclairage judicieux, a pris un caractère très attractif sans rien sacrifier à ses possibilités dans le domaine scientifique.

### **Cas particuliers.**

La lumière électrique peut être employée d'autres façons et à d'autres fins. Un de ses usages les plus intéressants est son emploi en vue d'une

signalisation à obtenir à volonté et immédiatement (principe des itinéraires lumineux sur les plans de métro). Une très belle réalisation de ce genre existe au musée de la Mer à Biarritz: une grande maquette du Golfe de Gascogne est exposée dans une salle éclairée seulement par la lumière des vitrines encadrées voisines. En pressant sur différents boutons on obtient l'éclairage, par des disques de couleurs variées, de tous les lieux de pêche pour une espèce de poisson donnée, ou de toutes les espèces de poissons qu'on pêche en tel lieu. Le dispositif est parfait. Dans le même ordre d'idées, chacun a pu voir au Palais de la Découverte une Drosophile métallique dont différents caractères (indiquant les mutations) sont mis en évidence par des éclairages appropriés.

## Conclusions.

Ces quelques exemples suffisent à montrer l'importance de l'éclairage dans la présentation des collections et, en définitive, dans le bon fonctionnement d'un musée scientifique. Il est évident que la lumière électrique est la seule qu'on puisse employer car on peut en faire varier à volonté, en toute connaissance de cause, et avec précision, les différentes qualités.

Toutes ces qualités sont à considérer: nature de l'éclairage (incandescent ou fluorescent), direction (angle d'incidence sur l'objet à éclairer), intensité absolue et intensité relative (par rapport à la lumière ambiante), différentes sortes de lumière blanche, longueurs d'onde des radiations (lumières différemment colorées), équipement électrique et emplacement des sources lumineuses dans les salles et les vitrines. Dans tous les cas interviennent des préoccupations — qui me semblent, actuellement à peu près satisfaites — au sujet de l'action nocive possible des différentes radiations.

Le problème de l'éclairage des musées, en raison des différents problèmes qu'il pose, est donc très important. Des études sont faites dans les laboratoires pour permettre aux constructeurs d'obtenir des qualités données de lumières et pour fournir aux conservateurs des précieux renseignements théoriques.

Mais ce qu'il reste à faire, ou à développer, c'est l'aide réellement pratique. Le conservateur qui veut mettre en valeur ses collections devrait pouvoir non seulement se procurer tel ou tel type de lampes, mais aussi disposer d'un choix d'appareils, de dispositifs d'éclairage, parfaitement étudiés, en étroite liaison avec la construction même des vitrines et l'architecture des salles.

Le but de ce rapide exposé n'est pas de donner des informations au sujet de réalisations faites, mais d'informer les spécialistes de l'éclairage des besoins spéciaux des musées scientifiques.

L'ETUDE DE LA COULEUR AU LABORATOIRE  
DU MUSEE DU LOUVRE  
APPLICATION A LA DECOUVERTE  
DE LA PLUS ANCIENNE PALETTE CONNUE,  
CELLE DE PAOLO VENEZIANO

SUZY DELBOURGO

Laboratoire du Musée du Louvre - Paris

Si la couleur n'est pour le physicien que la perception par l'oeil d'une vibration électro-magnétique, elle est aussi pour l'artiste la résonance d'une sensation plus ou moins profonde et l'interprétation du sentiment esthétique qu'elle procure.

Je dois à cette double appartenance de la couleur aux domaines apparemment si différents de la physique et de l'art d'avoir le plaisir de contribuer à ces VIIèmes Journées Internationales de la Couleur. Madame Hours — Chef des Services de notre Laboratoire du Musée du Louvre — vous aurait parlé avec infiniment plus de compétence et de talent que moi, mais elle n'a pu malheureusement venir et en est désolée.

Je voudrais aussi demander l'indulgence de ceux — techniciens de la couleur ou de la lumière — qui trouveront que cette contribution est trop éloignée et de leur spécialité, et du sujet même des entretiens d'aujourd'hui, plus particulièrement consacrés aux problèmes de l'éclairage dans les musées, alors que nous voudrions vous dire quelques mots de l'étude de la couleur au Laboratoire.

Contrairement à ce que l'on pense habituellement, la couleur « pour la couleur » est chose relativement récente dans l'art. C'est d'abord à la forme et à la plastique que l'antiquité a emprunté son moyen d'expression et c'est par elle qu'elle a transmis son message. Ce goût, ces pouvoirs de la couleur n'ont été exploités que plus tard puisque les Vénitiens sont les premiers à en avoir eu vraiment conscience. Et, dans l'histoire même de la peinture, il n'est pas difficile de retracer cette évolution où les lignes ont progressivement fait place aux couleurs.

C'est peut être ce qui explique en partie qu'il n'y a pas bien longtemps encore, cette étude systématique de la couleur, — soit qu'elle ait paru de moindre intérêt à l'esthéticien d'art, soit que les scientifiques aient mis

longtemps à y contribuer — cette étude de la couleur donc, n'a été longtemps confiée qu'à la seule culture et à la seule sensibilité des connaisseurs. Elle était menée empiriquement et il a fallu attendre en France le grand Pasteur pour entrevoir les fruits qu'une collaboration entre l'art et la science pouvait porter et pour en faire même le sujet d'un cours à l'École des Beaux Arts. Il disait par exemple à propos de l'étude des procédés de Van Eyck et de la peinture à l'huile ces paroles prémonitoires: « A quoi bon discuter indéfiniment — ce que l'on faisait jusque-là — pour savoir si ces maîtres employaient des vernis dans leurs peintures, pour connaître la composition des enduits, etc.? Que l'on étudie donc chimiquement leur peinture ».

Et depuis 1888, date à laquelle fut créé en Allemagne le premier organisme spécialisé, les laboratoires s'organisent dans tous les musées et sont chaque jour mieux équipés.

Donc, qu'attendons-nous, à l'heure actuelle, de ces études? Il faut d'abord dire que, dans l'étude scientifique des oeuvres d'art, dans l'analyse de la couleur, on ne doit jamais perdre de vue la prééminence du rôle conservatoire des musées. Les pièces de nos collections nationales sont avant tout nos trésors qu'il faut protéger contre la dégradation, le vieillissement et l'altération. La curiosité scientifique du chimiste doit savoir se plier à cet impératif et savoir profiter des occasions offertes à sa sagacité pour associer à ce souci de conservation une connaissance plus précise de la nature physique et chimique des matériaux employés; lorsque cette meilleure connaissance peut permettre de contribuer à la pérennité de l'oeuvre d'art, alors la mission du chimiste et du physicien se trouve doublement satisfaite.

Donc, nous voulons mieux connaître pour mieux conserver, pour mieux restaurer. Il est bien évident que la connaissance de l'état de la pellicule picturale, de la nature des couches la composant est d'une importance capitale lors des examens et nettoyages des oeuvres d'art.

La connaissance des pigments contribue aussi à accroître les possibilités de connaissance des techniques. En effet, l'étude de la matière première et des matériaux employés, en même temps qu'elle éclaire la connaissance des pigments, dans le temps et dans l'espace, nous précise l'histoire et l'évolution des techniques. Il est intéressant de savoir que certains pigments, par exemple les ocres, jaunes, rouges ou bruns, sont employés sans discontinuité au cours des temps depuis la préhistoire. Que pour des minéraux colorés comme l'azurite, la malachite, le lapis lazuli, le réalgar ou l'or-piment, leur emploi a d'abord été limité aux régions voisines de leur gisement, avant que les courants commerciaux ne les transportent plus loin; que certains pigments connurent un temps une grande faveur avant de disparaître de la palette du peintre comme c'est le cas du smalt, du jaune de plomb et d'étain, ou de la malachite. Un grand nombre d'informations sur l'histoire des matériaux colorés et un grand nombre de dates de l'histoire des pig-

ments ont ainsi été découvertes ces cinquante dernières années, mais il reste néanmoins beaucoup à faire dans ce domaine.

Un autre rôle de l'étude de la composition et de la technique de la préparation de l'oeuvre d'art réside dans l'estimation possible de l'âge et de la provenance des objets. A l'intuition, au sens inné de l'esthéticien, l'analyse chimique, l'examen scientifique viendront préciser si la technique et la composition concordent avec les impératifs de l'époque présumée.

Enfin, l'identification des pigments peut apporter des preuves toujours indiscutables dans la détection des faux. Si par exemple une toile supposée ancienne nous révèle à l'analyse un jaune de chrome dans sa couche originale — bien entendu il ne faut pas qu'il s'agisse d'un repeint — on peut être sûr que la toile a été peinte postérieurement à la date de fabrication de ce pigment, soit dans ce cas après 1810.

Nous allons maintenant dire un mot des méthodes d'analyse des pigments, qui sont principalement microscopiques et microchimiques. En effet les prélèvements sur les tableaux sont, vous le pensez bien, toujours rares et précieux. Ils doivent être effectués avec beaucoup de soins et de précautions, et ils ne dépassent que rarement la grosseur d'une tête d'épingle — sauf dans des cas exceptionnels comme le jour où on nous a demandé d'effectuer un prélèvement sur la peinture de la Tour Eiffel et où nous avons pu avoir moins de scrupules que lorsque nous étudions un Léonard de Vinci.

Ce prélèvement doit être convenablement préparé afin que son observation nous livre le maximum de renseignements. Les métallurgistes comme les biologistes ont dans des cas semblables mis au point la méthode dite de l'inclusion et c'est cette méthode qui est également la plus favorable dans notre cas. L'échantillon de pellicule picturale est inclus dans un bloc de résine poly-ester auto-durcissable à froid et préparé d'une manière classique. L'examen de la préparation au microscope va nous révéler la stratification des couches picturales depuis l'enduit jusqu'au vernis et permettra avant même de commencer toute analyse de différencier les couches originales des surpeints et de distinguer à l'intérieur des couches la nature cristalline des pigments. Un oeil entraîné a déjà par cette seule observation une excellente estimation de la structure et de la composition, voire de la technique du peintre.

On procède ensuite aux analyses proprement dites par les méthodes classiques de la microchimie et de la minéralogie.

Nous donnerons en exemple une étude effectuée au Laboratoire du Louvre (1) sur le retable de « La Madone entre les Saints » de Paolo Veneziano qui a été l'objet d'une étude intéressante.

(1) Une étude complète de ce tableau a été publiée par G. Bazin, M. Hours, J. Petit et J. Rudel dans le « Bulletin du Laboratoire du Musée du Louvre », Juin 1958 n. 3, pp. 2-22.

Cette oeuvre se présente en trois parties, la Madone datée de 1453 et deux volets représentant Saint François et Saint Jean Baptiste, Saint Jean l'Évangéliste et Saint Antoine. Ces deux derniers déposés en province depuis 1863 furent ramenés il y a quelques cinq ans au Louvre et M. G. Bazin, Conservateur en Chef du département des Peintures, estima que leur état nécessitait de nombreuses interventions. Les trois éléments furent donc conduits au Laboratoire pour les examens préliminaires. Ils étaient tous trois encadrés de bordures anciennes en forme de trilobes et de colonnettes (fig. 1) que l'on dut déposer pour les examens. C'est alors qu'apparurent, sur la partie de la préparation non recouverte de peinture, des taches de couleur — vert, rouge, bleu et marron — qui semblèrent à M. G. Bazin être des essais de palette de Paolo Veneziano (fig. 2).

De plus sur certaines parties, le doreur avait essayé les deux poinçons en point et en étoile avec lesquels furent fait les auréoles et les gaufrures du fond, ce qui vint accréditer l'hypothèse que les touches de couleur étaient bien de la main même de l'artiste puisqu'elles se trouvaient être sous les essais de poinçons (fig. 3).

Ces touches de couleurs furent regardées ainsi que l'ensemble du tableau sous les diverses radiations, rayons X, ultra-violet et infra-rouge, ce qui montra d'abord que les couleurs de cette palette réagissaient bien comme celles de l'ensemble du tableau.

Ce premier examen sous les radiations donne en effet des indications précieuses sur la composition des couleurs. Les rayons X (fig. 4) par exemple signale les zones du tableau où existent des éléments lourds comme les blancs de plomb, les rouges de mercure, le vermillon. Une teinte noire peut par exemple être obtenue avec deux corps aussi différents que le charbon ou la galène et la radiographie nous renseigne sans besoin de prélèvement. Les infra-rouges donnent (fig. 5) aussi de bons renseignements en signalant les couleurs plus ou moins absorbantes. Ici par exemple la photographie en infra-rouge montre que l'artiste a employé, pour foncer les bleus du manteau de la Vierge et du coussin, du noir de carbone qui absorbe complètement les infra-rouges. On décèle aussi la présence du charbon dans cette couleur marron de la palette que l'artiste a employé pour les ombres des visages de la Vierge et de l'Enfant Jésus et qui est effectivement composée d'ocre jaune et de noir de charbon.

Ainsi pourvu de tous ces éléments, on effectua l'analyse chimique proprement dite (2). C'était là chose relativement facile puisqu'on pouvait prélever des quantités beaucoup plus importantes que lorsqu'il s'agit de la matière même d'un tableau.

(2) Analyse effectuée par M. J. Petit Directeur du Laboratoire de Chimie Micromoléculaire du C.N.R.S.





FIG. 1

Paolo Veneziano. La Madone entre les Saints - Louvre - La Vierge.



Fig. 2  
Ensemble du retable.

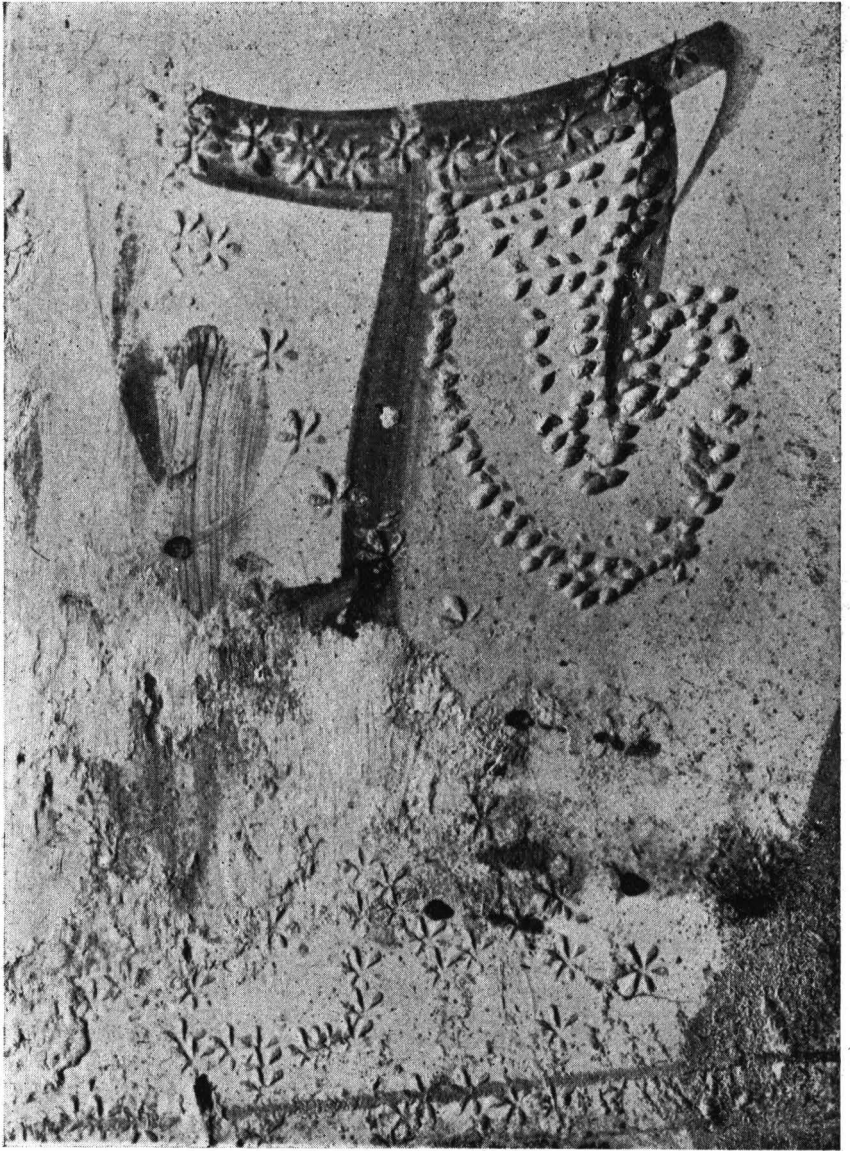


FIG. 3

Essais de poinçons sur les taches de couleur.

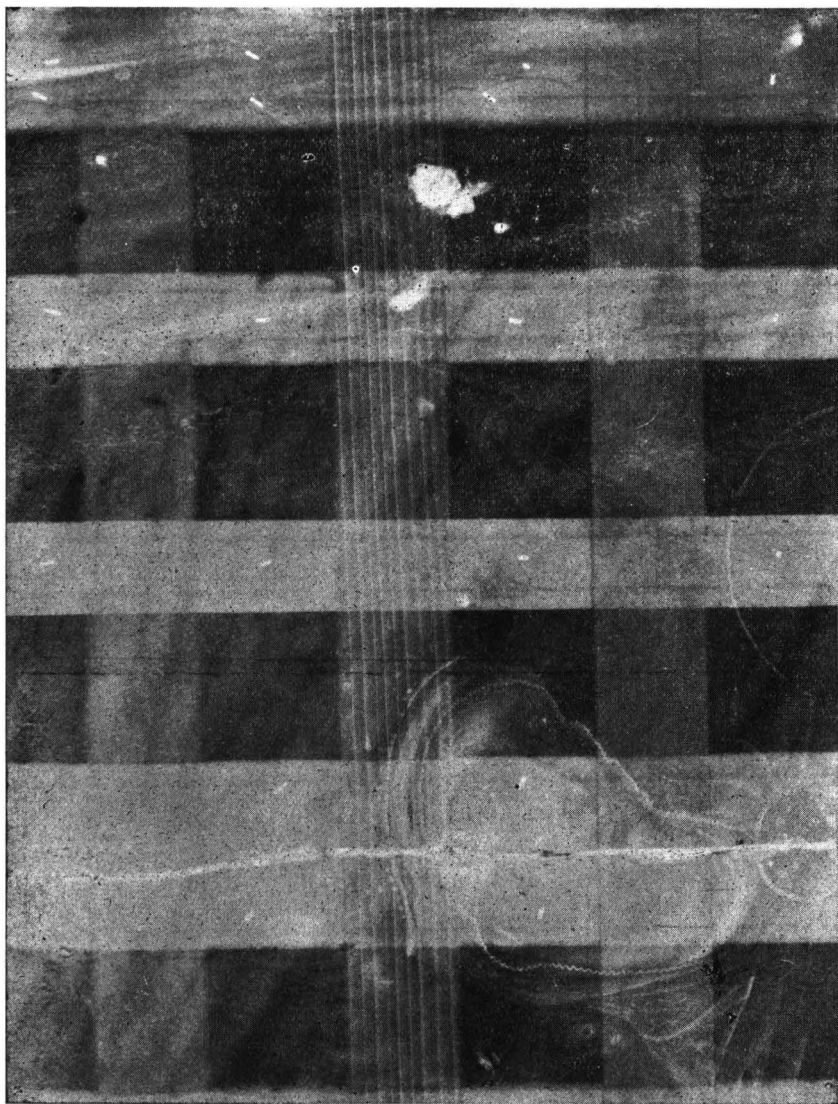


FIG. 4  
Radiographie du visage de la Vierge.



FIG. 5

Photographie en Infra-rouge du panneau central.



FIG. 6  
Photographie de la palette.

Il fut trouvé qu'il s'agissait (fig. 6):

- de malachite  $\text{Co}_3\text{Cu}$  pour la couleur verte (a)
- d'un rouge organique de garance pour la couleur rouge (b)
- de lapis lazuli — bleu d'outremer — pour le bleu (e)
- d'ocre rouge, plus charbon, pour la couleur marron (c).

Ces pigments sont en suspension dans un liant aqueux à base de colle animale.

L'enduit blanc du tableau est constitué par un mélange de carbonate de calcium et de plâtre encollé avec une matière albuminoïde.

Avec l'étude de ces couleurs, qui représentent peut-être la palette la plus ancienne que nous possédions puisqu'elle date de 1453, j'aimerais conclure ce rapide tour d'horizon de l'étude de la couleur au Laboratoire du Louvre en espérant vous avoir montré à la fois la variété des problèmes d'identification qui se posent à nous et la richesse réconfortante de renseignements que l'on peut obtenir.

Comme je l'ai dit au début de cette communication, ces investigations sont encore trop récentes pour nous permettre d'avoir un inventaire complet des techniques et des pigments employés par chacun des artistes dont les tableaux couvrent les cimaises de nos musées, mais c'est un travail que nous poursuivons patiemment et systématiquement au fur et à mesure qu'un tableau pour une raison quelconque nous est conduit au Laboratoire.

Cet inventaire de la couleur que nous voudrions constituer aura, lorsqu'il sera complet, une valeur inestimable, et pour le physicien, et pour l'historien d'art.

# EMPLOI DE LA PHOTOGRAPHIE EN COULEURS POUR LA REVELATION DES ÉCRITURES SOUS TACHE (NOUVELLES EXPÉRIENCES).

LUIGI LONGO

Istituto di Patologia del Libro « Alfonso Gallo » - Roma

Un sujet dont l'Istituto di Patologia del Libro de Rome s'occupe depuis plusieurs années (depuis 1939), est la révélation photographique d'écritures cachées sous des taches d'encre colorées (1)(2). La technique ordinairement employée consiste à exécuter la photographie en plaçant devant l'objectif de l'appareil photographique un écran de la même couleur de la tache. Le procédé est fondé sur la règle optique que « tout écran favorise le rendement de sa couleur et retarde celle de la couleur complémentaire ». Mais, la plupart des fois, dans les photographies effectuées par cette technique, bien qu'obtenant la révélation de l'écriture, on n'a pu jamais obtenir l'élimination complète de la tache. Souvent, donc, il n'a été pas possible d'obtenir la révélation intégrale de l'écriture. Pour réussir à éliminer complètement la tache, il faudrait disposer d'un écran ayant une couleur de la même longueur d'onde que celui de la tache. On pourrait choisir cet écran moyennant des mesures spectroscopiques de la couleur de la tache ou moyennant des épreuves photographiques effectuées par des écrans de diverses graduations de couleurs, mais toutes les deux techniques sont assez longues et présentent des difficultés. En occasion des « IV<sup>e</sup> Journées Internationales de la Couleur », qui eurent lieu à Rouen en 1960, je présentais une communication dans laquelle je parlais des expériences qui ont démontré que l'on peut appliquer pratiquement la photographie en couleurs afin d'obtenir des écrans ayant une couleur de la même longueur d'onde de la tache (3). Et tout cela parce que les progrès faits par la photographie en couleurs en ces derniers temps et ceux qu'elle est en train de faire, sont remarquables, et il est possible d'obtenir, dans les reproductions, le rendement exacte ou presque exacte des couleurs des objets. Il faut faire d'abord une photographie en couleurs de la tache d'encre colorée qui couvre l'écriture. Après l'on emploie la diapositive pour construire, par un spécial procédé, l'écran qui devra être utilisé pour la prise de la photographie en blanc et noir, qui permettra la révélation de l'écriture cachée.



Ensuite j'ai continué à m'occuper de ce problème et dans cette communication je vais exposer les premiers résultats d'un nouveau procédé formant l'objet d'une étude que je suis en train de faire avec la collaboration de M. Antonio Battista, technicien de l'Institut de Botanique de l'Université de Rome. Depuis longtemps j'avais observé que les taches d'encre rouge qui cachaient des écritures, disparaissaient complètement de façon à obtenir la révélation de l'écriture cachée, lorsque, dans une chambre complètement obscurcie, on projetait sur le papier une lumière de la même couleur. J'ai pensé alors que l'on peut employer le même procédé, c'est-à-dire la projection de la lumière de la même longueur d'onde de la couleur de la tache afin d'obtenir, au moyen d'une convenable prise de vues photographique en blanc et noir, la révélation d'écritures cachées sous des taches d'encre d'autres couleurs, pour lesquelles la révélation à travers l'observation oculaire est impossible. C'est pourquoi j'ai fait des expériences sur la question avec la collaboration de M. Battista susnommé; à travers ces expériences nous avons appris qu'il faut suivre le procédé suivant: On fait une photographie en couleurs du papier qui porte la tache d'encre colorée dissimulant l'écriture. L'on en tire la diapositive que l'on utilise pour projeter sur le papier, du côté de la tache, la couleur de cette dernière, en employant des dispositifs particuliers: Il faut faire la projection dans une chambre complètement obscurcie après avoir fermé l'appareil de projection dans une caisse, d'où rien que l'objectif fait saillie. Afin d'obtenir l'intensité nécessaire il faut superposer plusieurs diapositifs du même sujet, et les renfermer parmi les vitres d'un « chassis-presse ». Et tout cela parce que l'épaisseur du film est très mince (0,11 mm) et par conséquent l'épaisseur des couches colorées est encore plus mince. Sur les vitres du « chassis-presse » on attache du papier noir en laissant découvert seulement la partie de la diapositive correspondante à la tache. Voilà que lorsqu'on effectue la projection, la tache va être illuminée seulement par un faisceau de lumière de la même longueur d'onde de sa couleur et qui filtre à travers elle. En effectuant une prise de vues photographique en blanc et noir on peut arriver à obtenir dans la photographie la révélation de l'écriture cachée en même temps que la tache disparaît.

(1) MEDORI NOVATO, *Rivelazione fotografica di uno scritto macchiato*. « Bollettino dell'Istituto di Patologia del Libro », a. II, fasc. I, gennaio-marzo 1940, pp. 27-28.

(2) L. LONGO, *Rivelazione di scrittura sotto macchie*. Id., a. III, fasc. II, aprile-giugno 1941, pp. 81-82.

(3) « Couleurs », n 36 (3<sup>e</sup> trimestre 1960), p. 23.

Roma, Istituto di Patologia del Libro « Alfonso Gallo ».