

## Une expérience pluridisciplinaire : polyèdres et synthèse additive des couleurs

par R. JOUANISSON,  
Université de Clermont II.

---

*Les expériences décrites dans cet article ont été présentées lors des Journées de l'Union des Physiciens de l'académie de Clermont-Ferrand à Saint-Pourçain-sur-Sioule, en novembre 1984. Elles ont ensuite fait partie de l'exposition « Physicafoison » du Palais de la Découverte.*

La synthèse additive des couleurs permet de réaliser de belles expériences mais celles qui sont en général décrites dans les ouvrages exigent un matériel important. Par exemple, il faut trois objectifs pour projeter les images de trois sources colorées ; de plus, il faut disposer du matériel nécessaire pour faire varier l'intensité des faisceaux.

Or, il est possible de réaliser ces expériences avec des moyens extrêmement limités : trois lampes de poche et des accessoires qui pourront être construits par les élèves eux-mêmes (filtres colorés et quelques polyèdres).

Le principe de la manipulation est le suivant : une face plane constituée par un papier blanc mat reçoit un flux lumineux provenant d'une source colorée. Si la surface est suffisamment petite, elle est uniformément éclairée (\*) et sa luminance ne dépend pratiquement que de deux paramètres : son orientation par rapport à la source et la distance à celle-ci. On obtient une couleur quelconque simplement en superposant deux ou trois faisceaux, la composition du mélange étant obtenue par la variation d'un (ou deux) des paramètres  $\theta$  et  $d$ . Cette expérience permet également, grâce à une 4<sup>e</sup> source, (faisceau blanc), de faire varier le facteur de pureté. De plus, dans cette méthode la tem-

---

(\*) Si l'on désigne par  $\theta$  l'angle formé par la normale à la surface réceptrice et la direction de la source supposée ponctuelle,  $I$  l'intensité lumineuse dans cette direction et  $d$  la distance entre la source et la surface, l'éclairement reçu vaut :

$$E = \frac{I \cos \theta}{d^2}$$

pérature de la source ne varie pas, ce qui permet d'obtenir, en toutes circonstances, des filtres à couleur constante.

#### RAPPEL DE QUELQUES DEFINITIONS [1].

L'expérience montre qu'un faisceau coloré quelconque de luminance  $L$  peut être considéré comme la superposition d'un faisceau blanc de luminance  $L_w$  et d'un faisceau monochromatique de luminance  $L_d$  et de longueur d'onde  $\lambda_d$  (à l'exception des faisceaux pourpres.) Ainsi :

$$L = L_w + L_d$$

(la lumière  $w$  de référence est à spectre d'égalité énergie).

La longueur d'onde  $\lambda_d$ , dite dominante, correspond à la couleur du spectre qui s'en rapproche le plus.  $\lambda_d$  caractérise la *teinte*.

On appelle facteur de pureté la quantité :

$$p = \frac{L_d}{L} = \frac{L - L_w}{L}.$$

Pour une lumière monochromatique  $L_w = 0$ ,  $p = 1$  la teinte est dite saturée (on a une couleur pure).

Lorsque  $L_w$  augmente,  $p$  diminue : la couleur est de plus en plus lavée de blanc.

L'ensemble des trois facteurs  $\lambda_d$ ,  $p$  et  $L$  caractérise complètement l'aspect coloré d'un faisceau ; ces facteurs correspondent aux données psychophysiologiques que sont la teinte, la saturation et la luminosité.

#### SYNTHESE DES COULEURS.

L'expérience montre qu'à l'aide de trois couleurs fondamentales choisies arbitrairement (à la seule condition qu'aucune des trois ne puisse être obtenue par l'addition des deux autres), il est possible de reproduire n'importe quelle couleur. C'est pourquoi une telle synthèse est dite « *trichrome* ».

Par exemple, dans un système où l'on choisit les couleurs rouge, verte et bleue (on dit système R—G—B, initiales des mots anglais « red », « green » et « blue »), l'expérience montre que, dans la plupart des cas (seule la reproduction des pourpres pose des problèmes), on peut obtenir un faisceau coloré de luminance  $L$  à l'aide de faisceaux de luminance  $L_R$ ,  $L_G$ ,  $L_B$  convenablement choisis, ce choix n'étant possible que d'une seule manière. On a alors :

$$L = L_R + L_G + L_B.$$

On a ainsi réalisé une synthèse additive par opposition à la synthèse soustractive que l'on obtient en faisant passer successivement la lumière à travers trois filtres colorés, lesquels retranchent chacun une partie de la lumière.

## MATERIEL POUR REALISER UNE SYNTHESE TRICHROME.

### Sources de lumière.

On se procure trois lampes de poche, identiques de préférence, d'un modèle courant. Les lampes sont munies de réflecteurs de manière à concentrer la lumière. Pour notre expérience, il est indispensable d'obtenir une surface *uniformément éclairée* (par exemple sur un cercle de 15 cm de diamètre à un mètre de distance). Pour cela, on pourra être amené à utiliser un filtre légèrement diffusant (par exemple un morceau de verre antireflet, ou certains plastiques translucides). Avec un support trop diffusant, les pertes de lumière seraient trop importantes et, de plus, on ne pourrait pas observer avec suffisamment de netteté les ombres colorées : il y a un compromis à trouver.

### Les filtres.

Ils sont réalisés à l'aide de supports transparents (légèrement diffusants, comme on vient de le voir) colorés aussi régulièrement que possible avec des stylos-feutres du type utilisé pour écrire sur les transparents ; on choisit un jeu de filtres : rouge, vert, bleu. Des essais sont nécessaires pour obtenir une intensité convenable du faisceau coloré (par exemple on réalisera un jeu de filtres en coloriant plus ou moins une ou deux faces du filtre). Des filtres équilibrés permettent d'obtenir facilement du blanc quand les trois faisceaux agissent simultanément dans les mêmes conditions.

D'autres types de filtres peuvent convenir : des plastiques colorés, des morceaux de verre colorés (récupérés chez un maître verrier) avec lesquels on pourrait utiliser des sources plus puissantes.

### Les accessoires.

Ils sont réalisés à l'aide de papier blanc diffusant (type bristol). Les volumes auront des arêtes nettes et des faces *bien planes*. On commence par un tétraèdre régulier de 5 cm de côté environ, dont trois faces seront éclairées de manière à montrer simultanément les couleurs de base (fig. 1).

On fera réaliser ensuite une pyramide régulière à base hexagonale (fig. 2) de dimensions comparables, éventuellement une pyramide à 12 faces, un cône (fig. 6). On pourra réaliser également des polyèdres comprenant un grand nombre de faces : par exemple le dodécaèdre (fig. 10) l'icosaèdre (20 faces) et surtout les polyèdres étoilés dérivés [2].

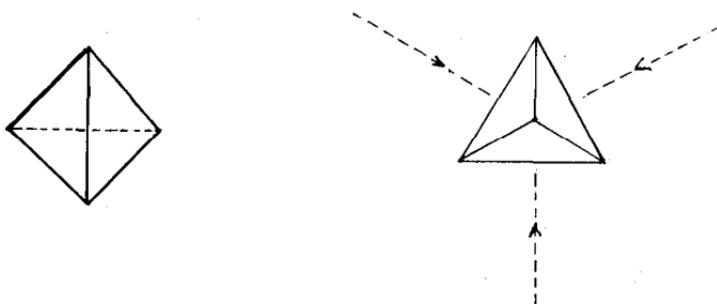


Fig. 1

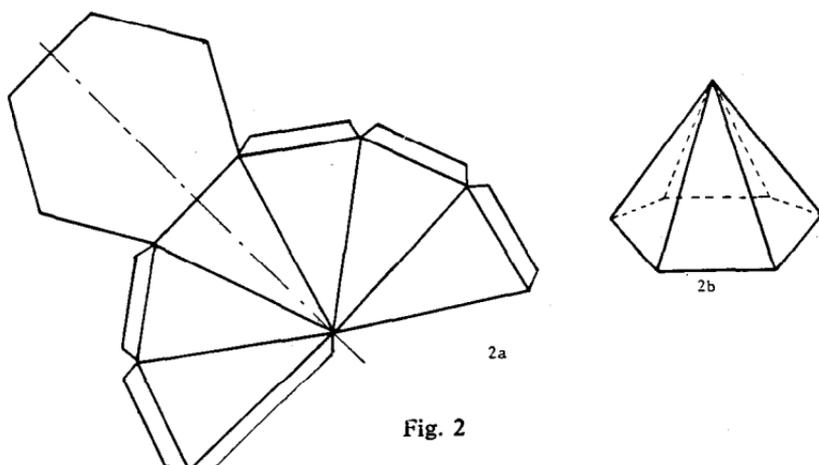


Fig. 2

### COMPOSITION DES COULEURS FONDAMENTALES.

La pyramide est posée sur une table (recouverte de papier blanc si l'on désire montrer les ombres portées colorées) sur laquelle on a tracé trois directions  $ox$ ,  $oy$ , et  $oz$  faisant entre elles des angles de  $120^\circ$  (fig. 3, 4).

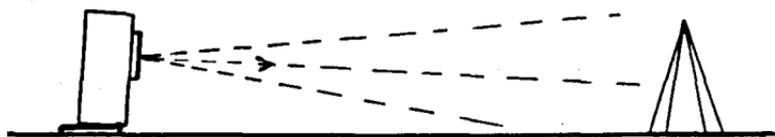


Fig. 3

Les lampes sont disposées selon ces directions, à environ 50 cm de la pyramide et réglées successivement de manière à éclairer uniformément les faces. Dans la disposition de la fig. 4,

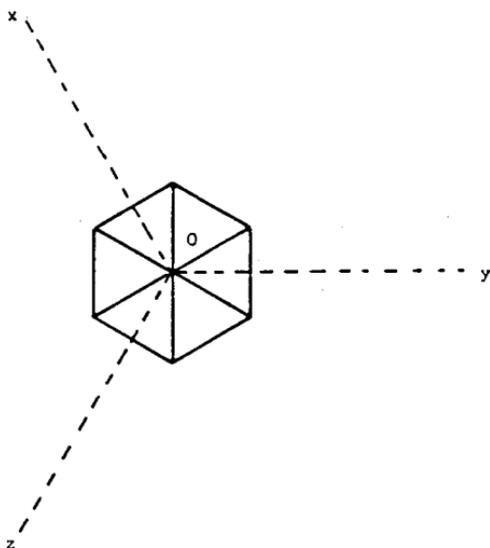


Fig. 4

chaque lampe éclaire trois faces, la face du milieu recevant un éclairement double de celui de chacune des deux autres.

La luminance des faces situées en regard des sources vaut respectivement  $L_R$ ,  $L_G$ ,  $L_B$ . Quand toutes les lampes sont allumées, on observe de nouvelles couleurs sur les faces intermédiaires : entre rouge et bleu on obtient du pourpre (ou magenta) de lumi-

nance  $L_{RB} = \frac{L_R}{2} + \frac{L_B}{2}$ , entre bleu et vert, on obtient un bleu-vert (ou cyan) de luminance :

$$L_{BG} = \frac{L_B}{2} + \frac{L_G}{2}$$

et entre rouge et vert, on obtient du jaune de luminance :

$$L_{RG} = \frac{L_R}{2} + \frac{L_G}{2}.$$

En se plaçant au-dessus de la pyramide, on voit donc six triangles colorés dont trois le sont avec de nouvelles couleurs obtenues par synthèse additive.

En réalité, en combinant deux couleurs fondamentales, on peut obtenir un grand nombre de couleurs intermédiaires. Re-commençons l'expérience en utilisant seulement deux couleurs, par exemple rouge et vert, les sources étant placées cette fois

devant deux faces contiguës, de sorte qu'on a quatre faces éclairées (fig. 5) et quatre couleurs différentes, à savoir :

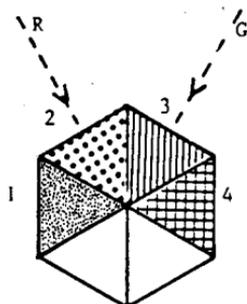


Fig. 5

face 1 :	luminance $L_R/2$	rouge,
face 2 :	» $L_R + L_G/2$	jaune orangé,
face 3 :	» $L_R/2 + L_G$	jaune vert,
face 4 :	» $L_G/2$	vert.

Par rapport aux expériences précédentes, on a seulement modifié la proportion des luminances respectives. On recommencera cette expérience avec les deux autres couples de couleur. On verra également que si l'on fait tourner la pyramide par rapport à son axe, les couleurs changent.

Naturellement, toutes ces expériences seront faites dans une salle suffisamment obscure.

### RECONSTITUTION D'UN SPECTRE CONTINU.

En multipliant le nombre de faces, on obtiendra un grand nombre de couleurs (pyramide à 12 faces). Avec un cône (fig. 6)

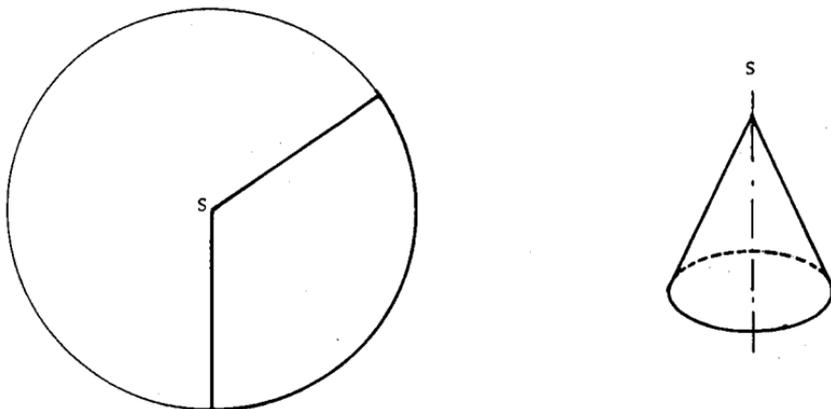


Fig. 6

et une disposition des sources conforme à la fig. 7, on obtiendra un spectre continu (impur) dans lequel manque le violet.

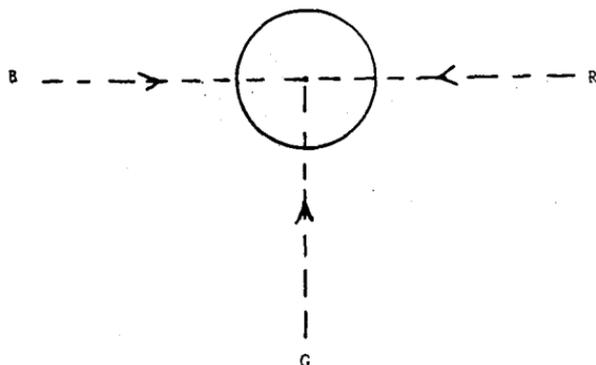


Fig. 7

### SYNTHÈSE DU BLANC.

La pyramide va nous servir également pour réaliser la synthèse du blanc à partir des trois couleurs fondamentales. Les trois sources sont placées maintenant de manière à éclairer la même face (fig. 8). Si les sources sont bien équilibrées, la couleur de la face (1) est très voisine du blanc (cette expérience pourra servir de test pour choisir convenablement les filtres) et il suf-

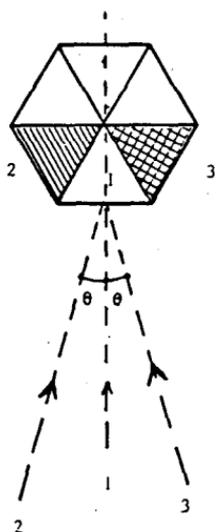


Fig. 8

fit de pouvoir modifier légèrement les luminances des faisceaux pour arriver à un résultat satisfaisant, ce que l'on réalise en opérant comme suit : une des sources reste sur l'axe de la face, tandis que les deux autres sont déplacées légèrement de part et d'autre de manière à procurer un éclaircissement variable. On arrivera facilement au résultat cherché en essayant diverses combinaisons. (On peut également éloigner ou rapprocher les sources.)

Lorsque la face (1) est blanche, les faces (2) et (3) sont colorées. Il y a un cas particulier intéressant et facile à réaliser, c'est celui où l'on obtient du blanc sur la face (1) avec les deux sources latérales placées symétriquement. Un petit calcul montre que le blanc a pour composition :  $L = L_1 + L_2 \cos \theta + L_3 \cos \theta$  ( $L_1$  étant la source placée sur l'axe de la face) et que la somme des éclaircissements des faces (2) et (3) a même valeur  $L$ . Autrement dit, les couleurs (2) et (3) sont alors *complémentaires*. On peut ainsi le voir simultanément (on verra plus loin que ces couleurs peuvent être observées dans les ombres portées par un objet éclairé convenablement). Si par exemple la source (1) est verte, la source (2) rouge, la face (2) est rouge et la face (3) bleu-vert (fig. 8).

De toutes façons, on pourra observer les couleurs complémentaires de la manière suivante : lorsque la face (1) est blanche, on occulte une source à l'aide d'un petit écran, on obtient sur la face (1) une couleur qui est complémentaire de celle qu'on obtient quand on occulte les deux autres sources simultanément.

Cette dernière expérience permet de montrer qu'il est possible d'obtenir la même couleur par deux méthodes :

- soit par soustraction d'une couleur à partir de lumière blanche,
- soit par addition de deux couleurs.

### OMBRES COLORÉES.

Pour obtenir une ombre nette, il faut disposer d'une source aussi ponctuelle que possible. On rendra une source quelconque plus « ponctuelle » en l'éloignant de l'objet dont on veut faire l'ombre. Au cours des expériences précédentes, on n'a pas manqué d'observer des ombres portées colorées de la pyramide et, à la lueur des explications fournies, chacun est en mesure d'expliquer la couleur de ces ombres. Interprétons un exemple simple à l'aide d'un morceau de tube blanc posé sur la table verticalement devant un écran blanc. On dispose les trois sources de manière à ce que le tube soit blanc sur la plus grande partie de sa surface (fig. 9).

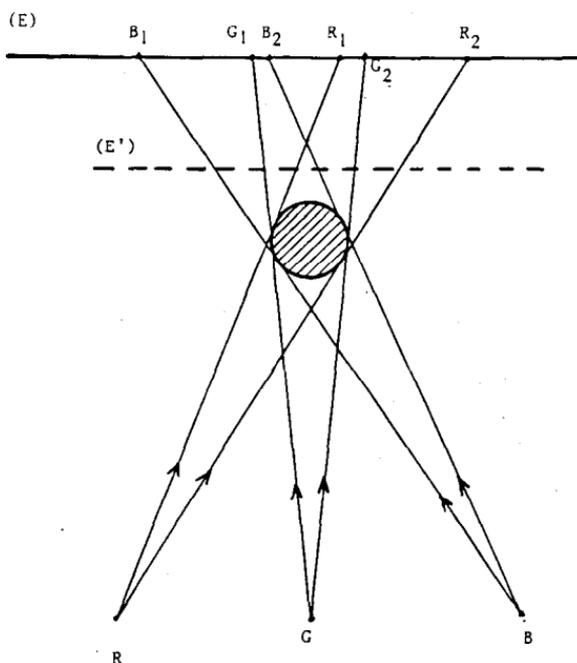


Fig. 9

La partie  $B_1G_1$  privée de lumière bleue est jaune (complémentaire); la partie  $G_1B_2$ , privée de bleu et de vert ne reçoit que du rouge; la partie  $B_2R_1$  est pourpre car elle ne reçoit pas de vert (complémentaire); la partie  $R_1G_2$  ne reçoit que du bleu et la partie  $G_2R_2$  privée de rouge est bleu-vert (complémentaire).

Si on déplace l'écran, en l'amenant par exemple en  $E'$ , l'aspect change : la partie  $B_2R_1$  qui ne reçoit plus de lumière devient noire.

### POLYEDRES COLORES [2].

On peut poursuivre les expériences précédentes en centrant désormais l'intérêt sur la construction de polyèdres plus compliqués, par exemple le dodécaèdre fig. 10, en collaboration avec le professeur de mathématiques. De belles surprises sont réservées à ceux qui réaliseront des polyèdres étoilés (par exemple celui obtenu à partir du dodécaèdre régulier). En les éclairant convenablement avec deux ou trois sources, on obtiendra un grand nombre de couleurs. De plus, grâce au relief, on verra de belles ombres portées colorées. Le spectacle devient féérique lorsqu'on

suspend le solide à un long fil (fil à coudre, de faible torsion) de manière à obtenir des couleurs changeantes au cours d'une lente rotation du solide.

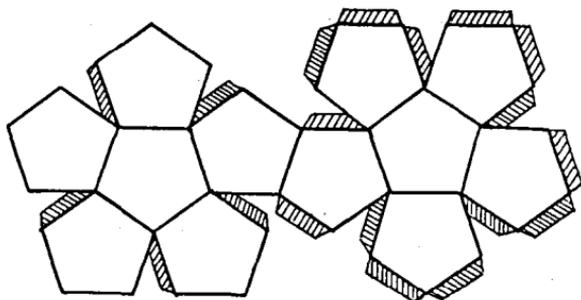


Fig. 10

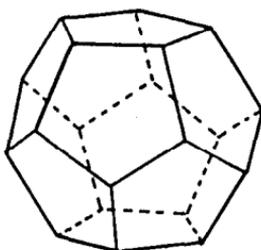


Fig. 10 bis

#### AUTRES EXPERIENCES.

— Grâce à une 4<sup>e</sup> lampe donnant un faisceau blanc on pourra, pour chaque couleur, modifier la pureté en lavant cette couleur de plus ou moins de blanc. L'expérience a surtout de l'intérêt si on part de filtres « purs ». En effet, les filtres obtenus simplement par la méthode décrite sont déjà lavés de blanc.

— Il est possible de réaliser des jeux de filtres différents : jaune, bleu, vert par exemple. On montrera l'inconvénient de ce système qui ne permet pas d'obtenir toutes les couleurs.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] On relira avec profit les chapitres « photométrie » et « couleurs et colorimétrie » par exemple dans « Lumière », FLEURY et MATHIEU (Eyrolles éditeur).
- [2] Pour la réalisation des polyèdres, on pourra consulter le beau livre de A. HOLDEN, « Formes, espaces et symétries », collection « Les Distracts », (Cédic éditeur).