

Note 144 : Le rituel fréquence = couleur

Voir CHAUVET F. (1994) *Construction d'une compréhension de la couleur intégrant sciences, techniques et perception : principes d'élaboration et évaluation d'une séquence d'enseignement*, Thèse Université Denis Diderot, Paris 7, p 17.

Une brochure sur la séquence de F. CHAUVET est jointe ci-après.

Voir aussi (versions française et anglaise) ce site qui propose de fournir aux formateurs d'enseignants des outils pour construire leur propre session de formation sur une séquence d'enseignement innovante pour l'enseignement en physique. Le thème choisi est la couleur. La stratégie dont il est question dans ce document est basée sur l'hypothèse suivante : la maîtrise d'un cadre conceptuel cohérent, quoique simplifié, concernant les phénomènes de couleur, devrait être accessible à un large éventail d'élèves, à partir de la quatrième et au delà. On attend que les élèves comprennent les phénomènes relatifs à la couleur, dans la vie quotidienne et dans les applications techniques :

http://www.lar.univ-paris-diderot.fr/sttis_p7/color_sequence/page_mere_fr.htm

UNIVERSITÉ PARIS 7
Denis Diderot

UNE SÉQUENCE D'ENSEIGNEMENT SUR LA COULEUR

F. CHAUVET

DOCUMENTS DE TRAVAIL
pour enseignants de collège et de lycée

LABORATOIRE DE DIDACTIQUE DE LA PHYSIQUE
DANS L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

« *La pleine compréhension des phénomènes naturels, comme nous les voyons, doit dépasser la physique au sens habituel. Nous ne nous excusons pas de faire ces excursions dans d'autres domaines, parce que la séparation des domaines (...) ne relève que de la commodité humaine et n'est pas une chose naturelle.* » (Feynman 1970)

1. INTRODUCTION

La séquence décrite¹ dans ce document a été proposée dans le cadre de l'enseignement de sciences appliquées pour les élèves des sections de Techniciens Supérieurs d'Arts Appliqués. L'objectif général de cette séquence est de donner aux étudiants des outils d'analyse et de compréhension des phénomènes de couleur, dans la vie quotidienne et dans les domaines artistiques et techniques.

Cette séquence a été construite en tenant compte des résultats d'une enquête préliminaire sur les idées et les modes de raisonnement de nos étudiants spécifiques. Nous explicitons ces conceptions, largement partagées, et les difficultés qui s'y rattachent, aux différentes étapes de la construction conceptuelle que nous proposons.

Avant la description de la séquence et des activités proposées, nous justifions nos choix en nous appuyant sur une analyse du concept de couleur et sur les résultats les plus marquants concernant les idées communes sur la couleur.

Ainsi nous souhaitons, compte tenu des programmes de quatrième et de l'option en première S/E, que les enseignants trouvent là matière à un approfondissement de connaissances susceptibles d'être réinvesties dans leur enseignement.

1.1. Qu'est-ce que la couleur ?

Plusieurs domaines de connaissances scientifiques sont nécessaires à l'analyse des phénomènes de couleur. Pour en rendre compte, nous envisageons les différents aspects, physiques, techniques et perceptifs. Sans chercher une compréhension des mécanismes détaillés dans chaque domaine, nous dégageons un noyau de notions et de relations que nous considérons comme suffisant pour atteindre une certaine cohérence.

1.1.1. Lumière et système visuel

La couleur est une réponse perceptive à une excitation lumineuse de l'oeil. Une lumière produit une sensation de couleur s'il lui manque certaines radiations parmi celles qui composent la lumière blanche. Les radiations électromagnétiques qui constituent « la lumière blanche » sont celles qui interagissent avec les récepteurs de la rétine et provoquent la vision : leurs longueurs d'onde sont comprises entre 400 nm et 700 nm.

¹ . Une version correspondant à la première année d'expérimentation a été rédigée pour le bulletin de l'Union des Physiciens et destinée aux enseignants de collèges (Chauvet 1993).

Lorsque la gamme des radiations du domaine visible est complète, il en résulte la sensation de blanc. Au contraire, lorsque les radiations présentes ont des longueurs d'onde voisines sur un intervalle limité, on dit que la lumière est monochromatique et la couleur perçue est dite saturée.

A chaque longueur d'onde λ du spectre visible, on peut associer une couleur, mais l'inverse n'est pas vrai. Si l'on dirige deux faisceaux laser, l'un rouge, l'autre vert sur une même plage d'un écran blanc, celle-ci sera perçue d'un jaune vif, alors que le spectre de la lumière reçue ne comporte aucune « longueur d'onde jaune ».

Ainsi la couleur ne peut pas être réduite à la valeur de la longueur d'onde associée. Une même couleur jaune peut être perçue lorsque la lumière reçue (le stimulus physique) comporte soit deux radiations monochromatiques dans le « rouge » et le « vert », soit une radiation monochromatique dans le « jaune », ou encore une bande large ($500 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$).

La réponse perceptive en termes de couleur pourra être prédite, dans certaines conditions d'observation, d'une part, si on connaît la composition de la lumière et, d'autre part, si on tient compte de la structure des récepteurs de l'oeil. Le système visuel est un instrument intégrateur, au contraire du spectroscope du physicien qui fait l'analyse de la lumière.

Ces remarques font apparaître une première difficulté à propos de la couleur dans l'enseignement scientifique : introduite à propos de la décomposition de la lumière, la couleur est d'abord associée à la longueur d'onde et souvent considérée comme une propriété intrinsèque de la lumière.

Analyser les phénomènes de couleur nécessite de mettre en relation la composition spectrale de la lumière et la réponse du système visuel, en notant que dans tous les cas, *l'information sur la couleur est transportée par la lumière.*

1.1.2. Interaction lumière et matière

Dans la vie courante et pour les applications techniques auxquelles nous nous intéressons ici, les couleurs perçues sont rarement produites par des radiations monochromatiques, mais beaucoup plus souvent par la *soustraction* partielle ou totale, dans la lumière blanche incidente, d'une bande de radiations plus ou moins large *absorbée* par la matière colorante. C'est le cas notamment des filtres (formés à partir de colorants organiques) et des pigments (minéraux ou organiques) qui absorbent de façon sélective certaines bandes de longueurs d'onde et transmettent ou diffusent le reste.

Les matériaux sont caractérisés par la bande de radiations qu'ils absorbent : une substance qui absorbe surtout la bande de radiations bleues et diffuse les bandes verte et rouge, paraît jaune lorsqu'elle est éclairée en lumière blanche. Mais la même substance paraît gris sombre, si on l'éclaire en lumière bleue.

La couleur n'est donc pas une propriété exclusive de l'objet, mais dépend aussi de la lumière qui l'éclaire. Le matériau coloré transforme la lumière incidente, ne renvoyant que la lumière correspondant à sa couleur.

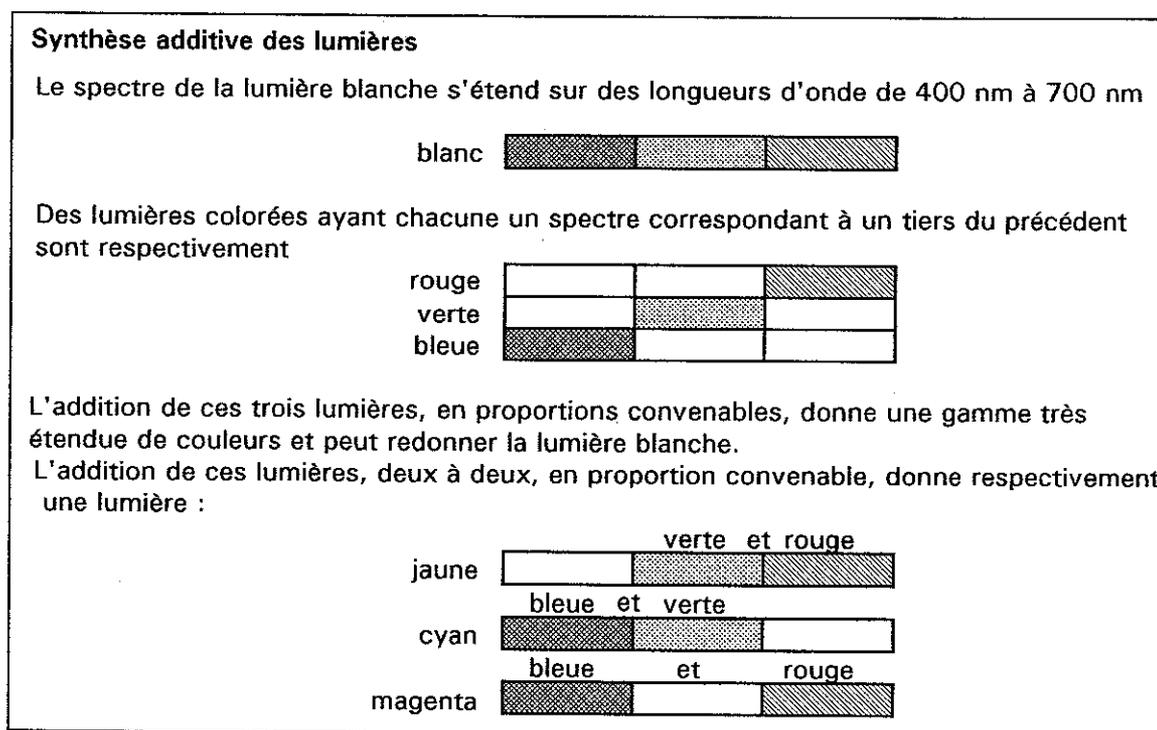
1.1.3. Synthèses additive et soustractive

Lorsque la lumière colorée provient d'une émission directe, par exemple dans le cas des luminophores des écrans couleurs des téléviseurs, la composition spectrale est également une bande large dans les domaines des longueurs d'onde courtes (bleu), des moyennes (vert) ou des grandes (rouge).

Le spectre de la lumière blanche peut être découpé de façon simplifiée en *trois bandes* correspondant aux couleurs rouge, vert et bleu appelées couleurs *fondamentales ou primaires de la synthèse additive*. Ce découpage en trois *tiers de spectre* se trouve à la fois justifié par les résultats expérimentaux de la colorimétrie (et les applications que sont les images électroniques) et les études sur la structure de l'œil.

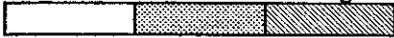
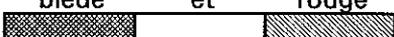
Les termes de « synthèse additive » et « synthèse soustractive » appliqués aux procédés de création de couleurs peuvent alors s'interpréter par la mise en relation de ce qu'on voit avec la composition simplifiée de la lumière reçue.

Schéma 1. Synthèse additive et synthèse soustractive : la couleur par tiers de spectre



Synthèse soustractive

Un filtre (ou un pigment) absorbe une partie du spectre de la lumière blanche :

Un filtre jaune absorbe la lumière bleue et diffuse les lumières verte et rouge	
Un filtre cyan absorbe la lumière rouge et diffuse les lumières bleue et verte	
Un filtre magenta absorbe la lumière verte et diffuse les lumières bleue et rouge	

Eclairés en lumière blanche, deux filtres superposés ou deux pigments mélangés ne renvoient vers l'oeil (transmettent ou diffusent) que la partie commune des spectres

jaune + cyan ---->		lumière verte
cyan + magenta ---->		lumière bleue
magenta + jaune ---->		lumière rouge

1.2. Idée commune sur la couleur

Le sens commun du mot couleur est associé à celui de matière colorée et les termes de couleur (rouge, vert ...) sont souvent compris par les élèves comme pigment rouge ou pigment vert. Y compris dans les situations expérimentales mettant en jeu le mélange de lumières colorées, nos étudiants se réfèrent aux techniques de synthèse soustractive dont ils connaissent les résultats par leur pratique de la peinture :

en mélange de peintures, « rouge » et « vert » donnent une couleur marron, alors que, en mélange de lumières, « rouge » et « vert » donnent une couleur jaune.

Ainsi, le fait de considérer la couleur comme un objet matériel constitue un obstacle à la compréhension, allant jusqu'à bloquer l'observation. C'est ce dont témoigne ce dialogue entre deux étudiants, placés dans une salle noire, devant un objet blanc éclairé simultanément avec de la lumière rouge et de la lumière verte, objet où s'observe un jaune vif :

Qu'est-ce que vous voyez ?

Alain : Ça tend vers l'ocre... c'est pas ocre mais ça tend vers le marron. Dans les mélanges picturaux, en principe, le rouge et le vert mélangés deviennent généralement une couleur marron.

Elodie : En pratique... Moi je vois du jaune.

Alain : Un jaune ?... du dessus, on ne voit pas du jaune, je vois du marron, y'a peut-être un problème ?... le problème, c'est qu'il y a deux couleurs superposées...

Elodie : Mets toi en face.

Alain : Du dessus je ne vois pas du jaune, de face... je vois du jaune. (Entretien n°4, Elodie / Alain)

Bon nombre d'étudiants, comme dans des populations plus jeunes, ont ainsi beaucoup de difficultés dans une analyse physique des situations mettant en jeu la lumière colorée et la diffusion de cette lumière par les objets.

Le caractère matériel qu'ils attribuent à la couleur s'oppose au caractère abstrait de la sensation de couleur produite par de la lumière. Les étudiants sont ainsi incapables de transférer leurs connaissances d'une technique à une autre, de l'addition de lumières à celle du mélange de matières par exemple. De plus, ils ne disposent pas d'outil de raisonnement opérationnel pour une analyse des situations complexes auxquelles ils sont confrontés dans leur formation professionnelle.

1.3. Les principaux choix de la séquence d'apprentissage

1.3.1. Stratégie d'enseignement

Pour donner une cohérence à l'ensemble des phénomènes conduisant à la perception de la couleur que nous venons d'évoquer, nous structurons un travail de conceptualisation de la couleur en trois phases.

La première phase consiste à provoquer une déstabilisation des étudiants dans leurs conceptions relatives à la couleur et à poser un problème qui n'est pas soluble par la connaissance du mélange de peintures. Les situations d'addition de lumières colorées, par leurs caractéristiques nouvelles, invitent les étudiants à ne plus utiliser comme unique mode de raisonnement les règles du mélange de peintures (séance 1).

Dans la deuxième phase, la notion de soustraction fait l'objet d'une attention particulière : elle est d'abord illustrée par l'effet d'un obstacle opaque dans des expériences d'« ombres colorées » (séance 2). Ce n'est qu'ensuite qu'elle est associée à la couleur des objets transparents ou opaques. La maîtrise d'une combinatoire sur les lumières colorées est un objectif visé avant de mener une analyse spectrale détaillée de la lumière blanche et des lumières colorées (séance 3). On fait ensuite apparaître l'*analogie de fonctionnement* par absorption sélective des matériaux transparents (filtres) et des matériaux opaques (pigments, peintures) par rapport à la composition de la lumière reçue par l'observateur (séance 4).

Enfin, dans une troisième phase, ces éléments conceptuels trouvent à se réinvestir dans l'analyse de phénomènes plus complexes, par exemple lorsqu'on éclaire des objets colorés non plus en lumière blanche mais en lumière colorée (séance 5).

1.3.2. Un outil de raisonnement : l'idée de chaîne

Pour rendre les étudiants capables de structurer des connaissances, nous proposons un outil pour l'analyse des situations de couleur :

|| l'idée d'une chaîne de traitement des informations sur la couleur
|| transportées par la lumière jusqu'à l'oeil.

La source émet la lumière, la matière colorée transforme la lumière reçue, la diffuse ou la transmet, la lumière émergente pénètre dans l'oeil de l'observateur jusqu'à la rétine. Ainsi dans l'espace physique, la lumière est le véhicule de l'information sur la couleur. La réponse perceptive est le résultat d'un traitement de cette information par le système visuel.

Le schéma qui suit traduit le cadre théorique dans lequel nous situons le concept de couleur.



Schéma 2. Chaîne d'information sur la couleur transportée par la lumière

Une analyse séquentielle de toutes les situations expérimentales proposées amène à se poser des questions relatives à chaque maillon de cette chaîne de transformation de la lumière :

- quelle est la composition de la lumière émise ?
- quelle est l'interaction entre lumière et matière ?
- quelle est la lumière transmise ?
- quelle est la réponse du système visuel ?

En bref, on cherche à substituer à des adhérences terme à terme, entre lumière et couleur ou entre couleur et matière, une trame de raisonnement impliquant un suivi sur un ensemble de transformations.

1.3.3. Guidage dans la construction des connaissances à partir de situations expérimentales

Dans cette séquence, l'attention et l'activité des étudiants sont constamment sollicitées à travers des demandes de **prévisions devant dispositif expérimental**, suivies d'observation, de débats, de synthèses verbales ou graphiques.

L'étudiant est considéré comme devant construire activement ses connaissances, compte tenu de celles qu'il possède déjà. Mais si son cheminement est actif, il est aussi, dans cette proposition, très guidé. La proposition du problème, dans la classe, se fait à partir de situations construites pour ce public. La construction de connaissances, si elle a lieu, se fait dans la mesure où les étudiants se prêtent au jeu et donnent du sens aux questions proposées.

L'aptitude à raisonner est sollicitée par le fait que les outils conceptuels nécessaires à la solution des problèmes posés sont en principe toujours disponibles parce qu'objets des séances précédentes. On cherche ainsi à promouvoir une attitude de confiance en la mise en oeuvre d'un raisonnement, par opposition au problème rappel de connaissances mémorisées.

Ceci ne peut se faire sans une importante planification des « entrées en scène » des éléments conceptuels visés. Mais l'abondance des phases de débat et l'initiative laissée aux étudiants d'exprimer leurs propres points de vue autour de chaque situation expérimentale contribuent à équilibrer l'apparente rigidité de la proposition.

2. DESCRIPTION DE LA SÉQUENCE

2.1. Introduction

2.1.1. Présentation

La séquence que nous décrivons ici se déroule sur une durée globale d'une quinzaine d'heures. Le découpage est fait selon cinq séances, chaque séance dure un ou plusieurs cours par tranche de deux heures (avec pause). Le rythme des cours, pour les étudiants, est de deux heures par quinzaine.

La description qui suit comporte pour chaque séance l'objectif d'ensemble. Nous donnons en encadré les textes écrits mis à la disposition des élèves, supports des activités et des questions proposées.

A cela s'ajoutent les éléments conceptuels et les éléments d'information qui peuvent, au choix du professeur et selon les groupes, être plus ou moins développés.

Tout le matériel qui sert de support à l'expérimentation par les élèves eux-mêmes est réalisable avec des fournitures banales. Il est prévu pour un travail par groupes de trois ou quatre. Les indications techniques sont données en annexe 3. Notons que les effets visuels sont d'autant plus contrastés que la salle est plus sombre.

2.1.2. Prérequis : propagation rectiligne de la lumière et vision d'objet

Une séance préalable à la séquence, d'environ deux heures, est consacrée à des activités s'inspirant de celles décrites par W. Kaminski (1989) dans sa séquence d'optique élémentaire. Ces activités permettent de rappeler ou d'explicitier certaines propriétés de la lumière, telles que la propagation rectiligne en l'absence d'obstacle, la nécessité de recevoir de la lumière dans l'oeil pour voir quelque chose, et ceci que la lumière soit produite ou diffusée par les objets.

Il en va de même pour les ombres qui sont utilisées dans la suite de la séquence comme support pour l'étude de phénomènes colorés et dont les conditions de formation sont rappelées ici.

2.2. Phase 1 : poser le problème en tenant compte des conceptions des élèves

Nous choisissons d'aborder le thème de la couleur par une situation de production de couleurs par addition de lumières colorées. En effet, l'enquête préliminaire (page suivante) montre que les étudiants associent souvent la couleur à la matière colorée qu'ils ont l'habitude de manipuler et dont ils connaissent les règles de mélange. La situation proposée crée un conflit entre la prévision et l'observation, déstabilisant un grand nombre d'étudiants. Des questions peuvent alors guider les étudiants dans la résolution de ce conflit et dans la recherche de cohérence.

2.2.1. Addition de lumière rouge et de lumière verte et réponses des étudiants avant la séquence

Questions

1. Au cours d'un spectacle, on projette au même endroit d'un décor blanc un faisceau de lumière rouge et un faisceau de lumière verte. Qu'observe-t-on, là où les faisceaux se superposent ?
(cochez la ou les réponses qui vous semblent justes)

du blanc

du marron.....

du jaune

du rouge et du vert.....

je ne sais pas

2. Où se crée cette couleur ?

dans l'espace où les faisceaux se rencontrent.....

sur le décor.....

dans l'oeil de l'observateur (sur la rétine).....

dans le cerveau de l'observateur.....

Commentaire et/ou schéma :

Réponses des étudiants

du blanc	du marron	du jaune (réponse correcte)	du rouge et du vert	je ne sais pas
28 %	50 %	3 %	10 %	9 %

- dans l'espace où les faisceaux se rencontrent et/ou sur le décor	30 %
- dans l'espace et/ou sur le décor et dans l'oeil et/ou le cerveau	30 %
- dans l'oeil de l'observateur (sur la rétine) et/ou dans le cerveau de l'observateur (réponse correcte)	40 %

Commentaires

La couleur observée par superposition d'un faisceau de lumière rouge et d'un faisceau de lumière verte sur un même support diffusant blanc est jaune. Cette réponse correcte est très minoritaire (< 5%). Pour 50 %, la référence est ici explicitement celle du mélange de peintures, « rouge + vert = marron ».

Pour répondre à la deuxième question, 30% des étudiants ne prennent pas en compte l'observateur, alors que la proposition leur en est faite.

Obtenus en 1991 avec une population de 60 étudiants, titulaires du baccalauréat et avant enseignement par la séquence, ces taux de réponses se sont révélés remarquablement stables au cours de ces dernières années.

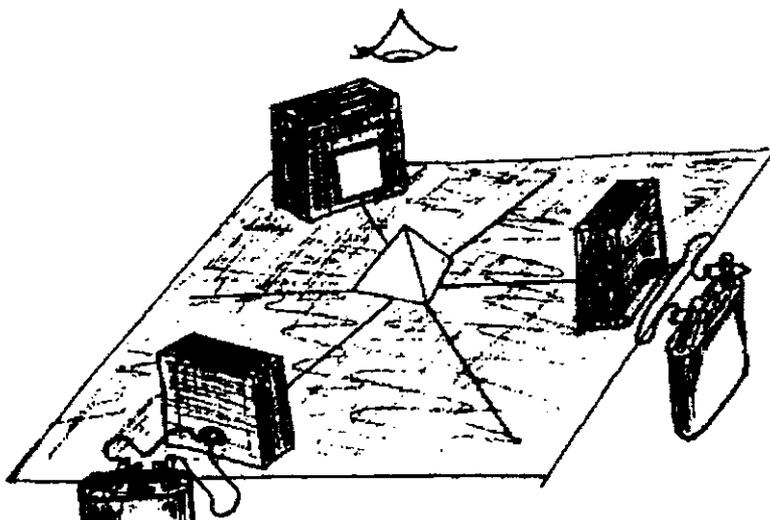
2.2.2. Séance n°1 : produire et voir des couleurs

Toutes les situations expérimentales décrites² dans les encadrés 1 et 2 (figs. 1 et 2) permettent d'introduire une analyse simplifiée de la composition de la lumière reçue par l'observateur et une mise en relation de celle-ci avec la couleur perçue.

Des lumières colorées à l'aide de filtres sont envoyées sur le papier blanc mat et diffusant d'un petit objet de forme tétraédrique (T) ou pyramidale à base hexagonale (H).

L'activité proposée aux étudiants est une analyse des diverses situations où des couleurs sont observées. La verbalisation est suscitée par un jeu de questions sur lesquelles les étudiants engagent la discussion et produisent une réponse écrite par petits groupes. Les encadrés qui suivent sont mis à la disposition des étudiants mais, au cours de la séance, ils sont amplement commentés oralement en insistant sur les questions posées et sur une demande d'explicitation des réponses, soit sous forme verbale, soit sous forme de schémas.

Figure 1



². JOUANISSON R. (1985), « Une expérience pluridisciplinaire : polyèdres et synthèse additive des couleurs », *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 676, p. 1351-1360.

Encadré 1

Produire et voir des couleurs**Matériel.**

On dispose de quatre sources de lumière blanche, de la lumière colorée peut être obtenue à l'aide de filtres. On dispose de filtres rouge, vert et bleu [RVB] et de filtres cyan, magenta et jaune [CMJ].

On a fabriqué des objets en bristol blanc, mat et diffusant : un tétraèdre T et une pyramide à base hexagonale H.

Ces objets peuvent tourner autour d'un axe de symétrie vertical passant par O, dessiné sur la base où sont représentées également des directions faisant des angles de 60° .

L'observateur se place à la verticale de O et il peut voir simultanément sur le même fond noir les diverses faces des objets. Les expériences sont réalisées dans une salle noire.

1. Lumières colorées et couleurs observées.*1.1. Rouge, Vert, Bleu*

Placer les trois sources pour que chaque face de T soit éclairée de façon uniforme en lumière rouge, verte ou bleue et que les faces paraissent également lumineuses. Sur un schéma, indiquer la position de T et les positions des sources.

Comment changer l'éclairage de chaque face, tout en les maintenant rouge, verte et bleue, c'est-à-dire sans changer la teinte ?

1.2. Produire d'autres couleurs

Prévision : quelles couleurs observera-t-on sur les faces si on tourne T de 60° ?

Faire tourner T : on observe d'autres couleurs. Décrire les couleurs observées sur chaque face et proposer une analyse de la situation en vous aidant d'un schéma.

Quelles lumières reçoit l'observateur, lorsqu'il regarde la face jaune ? Où se crée la couleur ?

2. Couleurs identiques, couleurs primaires

Avec deux méthodes différentes, pouvez-vous rendre identiques deux faces de T, en utilisant les filtres de votre choix parmi les six filtres dont vous disposez ? Réalisez l'expérience.

Faites un schéma de la situation en précisant les faisceaux lumineux qui parviennent sur chaque face et ceux que reçoit l'observateur.

Essayez avec d'autres couleurs...

Notez vos observations et la méthode utilisée pour produire une couleur.

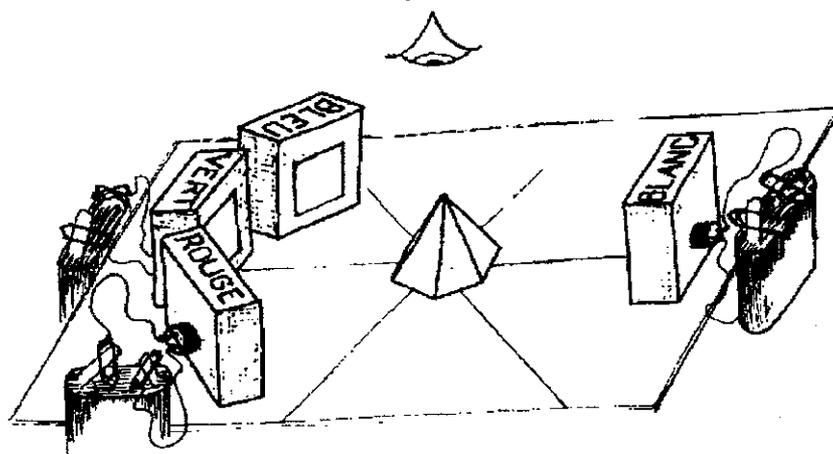
Quelles couleurs ne peuvent pas être obtenues par mélange de deux autres ?

Ce sont les couleurs primaires en lumière.

Quelles couleurs peuvent être obtenues par mélange de deux autres ?

On les appelle parfois couleurs secondaires.

Figure 2



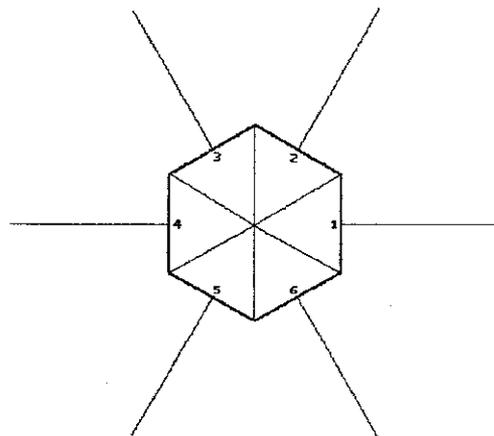
Encadré 2

3. Lumière blanche.

Mettez la pyramide sur la base et éclairez une face n°1 avec de la lumière blanche.

3.1. Peut-on éclairer la face opposée n°4 de telle sorte qu'elle paraisse également blanche, en superposant trois lumières colorées seulement? Lesquelles choisir pour que les faces 3 et 5 **présentent les couleurs les plus vives** ?

Faites un schéma du montage vu de dessus (position des sources, direction principale des faisceaux) et notez les couleurs observées. Faites varier l'ordre dans lequel sont disposées les trois sources et notez à chaque fois les couleurs observées sur les faces n°3 et n°5.



3.2. Refaites l'expérience avec les trois autres filtres. Comparez les couleurs des faces 3, 4 et 5 avec celles obtenues précédemment en 3.1.. Concluez : pourquoi les lumières R, V, B sont-elles choisies comme "primaires" pour créer des couleurs par addition de lumières ?

4. Lumières de couleurs complémentaires.

4.1. Observation des faces latérales et comparaison des luminances

Lorsque les faces opposées n°1 et n°4 sont également blanches (cas 3.1.), évaluez par comparaison les luminances de chaque face pour chaque faisceau lumineux. Si l'on admet que les luminances s'ajoutent, que valent les luminances des faces 3, 4, 5 ?

4.2. Couples de couleurs complémentaires

Avec les filtres dont vous disposez, recherchez les **combinaisons de deux lumières** qui par addition permettent de rendre identiques la face n°4 et la face n°1, toujours éclairée avec de la lumière blanche ? Récapitulez.

De tels couples de lumières colorées sont appelés *lumières de couleurs complémentaires*. Proposez une définition générale.

2.2.3. Informations complémentaires

1. Décrire ce que l'on voit : caractéristiques psychologiques d'une couleur

Pour caractériser n'importe quelle couleur, couleur d'une source de lumière ou couleur d'un objet, trois attributs psychologiques différents sont nécessaires : la teinte, la saturation et la luminosité (voir annexe 1.4.). La connaissance de ces paramètres peut faciliter la description de la perception colorée.

La *teinte* se caractérise dans le langage courant par les adjectifs rouge, vert, bleu....

On peut représenter la succession des couleurs obtenues par synthèse additive sur un cercle, dénommé cercle chromatique. L'addition dans une proportion donnée de lumière rouge et de lumière verte donne un jaune....

La *saturation* indique comment la couleur se rapproche plus ou moins de la couleur pure correspondante et diffère du blanc. Elle réfère à la quantité relative de lumière pure qui doit être mélangée à la lumière blanche pour produire la couleur perçue.

Par exemple, du rose est obtenue par addition de lumière magenta et de lumière blanche.

Dans le langage courant, cette caractéristique se traduit aussi par le mot pureté et par les adjectifs : pur ou saturé, lavé de blanc, lavé ou désaturé.

La *luminosité* est l'attribut de la sensation visuelle selon laquelle une source de lumière déterminée paraît émettre plus ou moins de lumière, les adjectifs utilisés sont *intenses et faibles*.

Pour un *objet diffusant*, on parle de clarté, l'objet paraît *clair ou foncé*. La perception de la luminosité d'une plage est une fonction de l'intensité de la lumière renvoyée par la plage. Cette dimension n'a pas sa place sur le cercle chromatique.

La grandeur photométrique associée à la luminosité est la *luminance* de la surface.

En postulant l'indépendance de la luminosité et des autres paramètres de la couleur, valable dans un domaine limité de variation de luminosité, la description de la perception de la couleur peut donc se faire à l'aide de trois paramètres indépendants.

2. Mesurer la lumière et la couleur

La première situation (voir figure 1 et encadré 1) invite à une analyse en termes de lumière : de la lumière est émise par la source et se propage entre la source et le papier ; la surface de papier est éclairée ; de la lumière est renvoyée par la surface du papier diffusant blanc dans toutes les directions et pénètre dans l'oeil de l'observateur. On admet ici que le papier est un diffuseur parfait, c'est-à-dire qu'il présente la même luminosité, quelle que soit la direction d'observation et quelle que soit la couleur.

Les caractéristiques géométriques simples des dispositifs permettent une comparaison des luminances des faces. En effet, lorsque nous observons une plage

éclairée, la seule grandeur physique qui ait un sens pour l'oeil est la luminance prise par cette plage. (Voir rappels de photométrie en annexe 1).

En faisant varier les conditions d'éclairement énergétique de la face, c'est-à-dire en éloignant ou en rapprochant la source et en modifiant l'orientation relative de la source et de la surface diffusante, on fait varier la quantité de lumière diffusée vers l'observateur, c'est à dire la luminance de la face.

La luminance se rattache à l'éclairement énergétique par l'intermédiaire de deux facteurs qui dépendent de la composition spectrale de la lumière : d'une part, l'efficacité lumineuse spectrale $V(\lambda)$ caractérisant l'oeil humain pour la vision des couleurs et, d'autre part le facteur de luminance de la surface éclairée.

On admet ici qu'avec le papier blanc éclairé par un flux lumineux coloré donné, éclairement et luminance sont proportionnels pour une géométrie donnée et que la teinte ne change pas.

Lorsque plusieurs lumières colorées (voir figure 2 et encadré 1) sont utilisées, chaque trajet peut être identifié, l'objet blanc diffuse toute lumière reçue et les lumières colorées sont juxtaposées jusqu'à leur entrée simultanée dans l'oeil, sans interaction entre elles.

On admet l'additivité des luminances : pour un ensemble de radiations de longueurs d'onde différentes, la luminance totale s'obtient par addition des luminances composantes (loi d'Abney).

Une analyse quantitative simplifiée des situations expérimentales proposées peut ainsi être menée et chaque composition de lumière peut être associée à une couleur perçue (voir schéma 3 et schéma 4, pages suivantes).

3. La vision des couleurs

On souligne le fait que des lumières colorées superposées et arrivant simultanément dans l'oeil de l'observateur ne donnent qu'*une seule réponse* (encadré 2, question 1.2.).

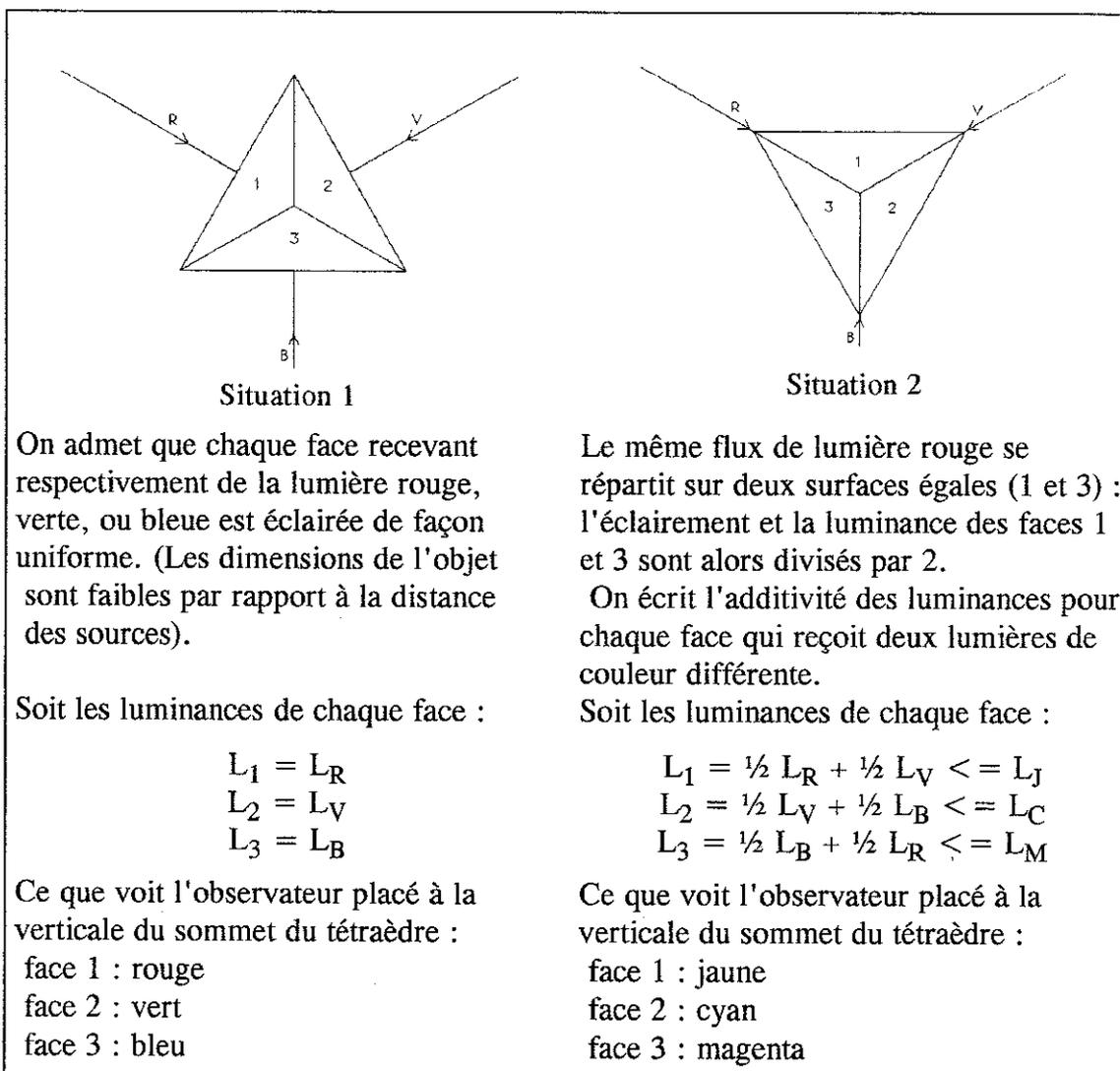
Une gamme de « jaune » est obtenue lorsque les lumières rouge et verte sont en proportion variable,

une gamme de « magenta » lorsqu'elles sont rouge et bleue,

une gamme de « cyan » lorsqu'elles sont verte et bleue.

Le système visuel est donc un *instrument intégrateur*, à l'inverse du spectroscope qui fait l'analyse de la lumière. L'oeil est également utilisé ici comme *instrument de comparaison* (encadré 2, question 2) : une même réponse perceptive peut correspondre à des compositions différentes de lumières reçues, et ceci quel que soit l'observateur. L'identité perceptive de deux plages, pour un observateur, est traduite par le symbole " \leq ", utilisé dans les schémas 3 et 4.

Schéma 3. Analyse quantitative simplifiée : addition de lumières.



4. Aspect technique : production de couleurs par synthèse additive

Ces situations sont une introduction expérimentale à la synthèse trichrome additive : trois lumières rouge, verte et bleue, sont suffisantes pour permettre la production, par addition, de toute une gamme de couleurs. Ces lumières colorées sont considérées comme *primaires*³ de la synthèse additive.

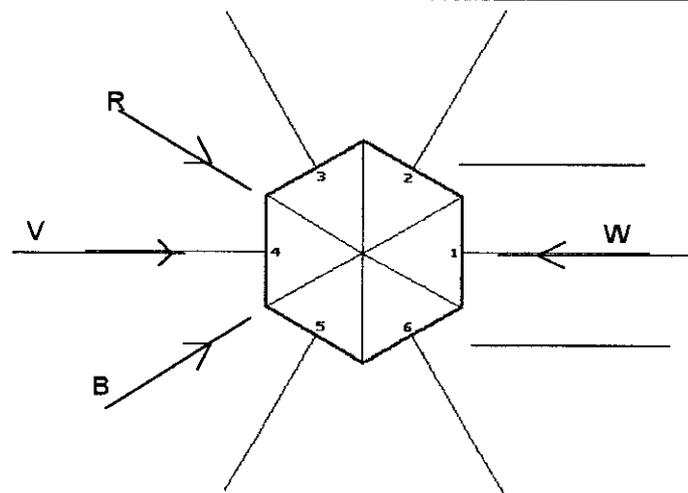
Une lumière de couleur quelconque peut être caractérisée par la proportion de chacune de ces lumières colorées. De même, la lumière blanche résulte de l'addition, en proportion convenable, de l'addition des trois lumières rouge, verte et bleue.

L'utilisation de la pyramide hexagonale (encadré 2, question 3) donne l'occasion d'observer et de définir des lumières de couleurs *complémentaires* par rapport à la lumière blanche : couples de lumières colorées dont l'addition

³ Le terme *couleur primaire* signifie qu'aucune d'entre elles, dans un système de trois couleurs, ne peut être obtenue par mélange des deux autres. Le sens du mot *primaire* est le même pour la synthèse additive et soustractive. Les couleurs choisies sont différentes.

redonne la même impression que la lumière blanche de référence. Ainsi lorsque la face centrale est blanche, les deux faces latérales sont de couleurs complémentaires (par exemple bleu et orange).

Schéma 4. Analyse quantitative simplifiée : lumières de couleur complémentaire.



Situation 3

Les faces 3 et 4 reçoivent de la lumière rouge sous le même angle : les luminances sont égales, soit L_R ;

les faces 4 et 5 reçoivent de la lumière bleue sous le même angle : les luminances sont égales, soit L_B ;

La face 4 reçoit de la lumière verte sous une incidence nulle, soit L_V sa luminance. Les faces 3 et 5 reçoivent de la lumière verte sous une incidence de 60° : soit $\frac{1}{2} L_V$

Lorsque les trois lumières sont allumées et la face 4 identique à la face 1 éclairée en lumière blanche (W) les luminances de chaque face s'écrivent :

$$\begin{aligned} L_3 &= L_R + \frac{1}{2} L_V \\ L_4 &= L_R + L_V + L_B \leq L_1 \leq L_W \\ L_5 &= L_B + \frac{1}{2} L_V \\ \rightarrow L_3 + L_5 &\leq L_W \end{aligned}$$

L_3 et L_5 sont deux **lumières de couleur complémentaire** : leur addition redonne le blanc de référence.

Ce que voit l'observateur placé à la verticale du sommet de la pyramide :

face 3 : orange	face 1 : blanche
face 4 : blanche	face 2 : grise
face 5 : bleu (turquoise)	face 6 : grise

On vérifie aussi que l'addition de trois lumières jaune, magenta et cyan redonne bien le blanc de référence, mais la gamme de couleurs obtenues par mélanges en proportions variables est alors une gamme désaturée. Un tel système

de "primaires" ne convient pas pour produire une gamme étendue par addition de lumières.

On peut faire référence au principe de production des couleurs par les écrans de télévision et aux dispositifs de réglage des couleurs des logiciels de dessin assisté par ordinateur (DAO) ou « palette graphique ».

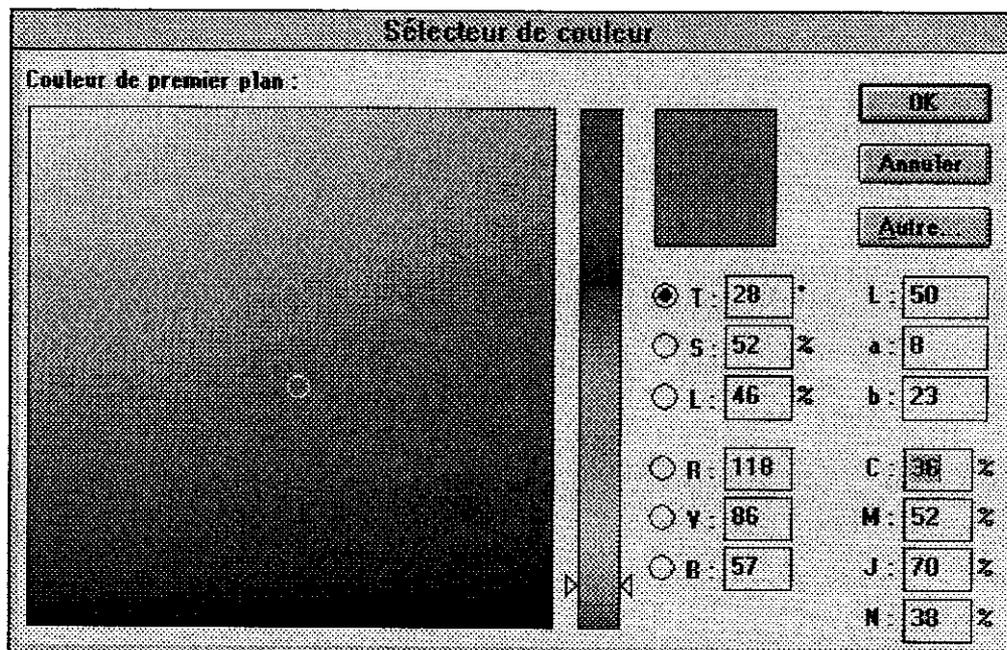


Schéma 5. Fenêtre de sélection de couleur, logiciel ADOBE PHOTOSHOP.

Une couleur est repérée dans quatre systèmes différents, liés entre eux et laissés au choix de l'utilisateur.

1. **R V B** : définition de la couleur relative à l'écran vidéo ; les niveaux de luminance des lumières rouge, verte et bleue sont définis sur une échelle variant entre 0 et 255.

2. **T S L** : la définition de la couleur correspond aux paramètres perceptifs de teinte (variant de 0 à 360° sur le cercle chromatique), de saturation et de luminosité (variant entre 0 et 100).

3. **L a b** : coordonnées de la couleur dans le système colorimétrique L, a, b.

4. **C M J N** : quantités (entre 0 et 100) d'encres cyan, magenta, jaune et noir pour une impression en quadrichromie.

Notons que certaines couleurs d'écran ne sont pas imprimables avec les encres de référence.

2.3. Phase 2 : production de couleurs par soustraction

2.3.1. Séance n°2 : ombres colorées sur un écran blanc

1. Deux objectifs

Cette expérience classique, montrée dans les musées scientifiques, a produit la surprise chez nos élèves et ceci pour deux raisons. La première est que les ombres, dans cette situation, sont colorées de teintes vives en contradiction avec la conception courante de l'ombre noire ou foncée, conception qui apparaît dans la phase de prévisions dans tous les groupes interrogés.

La seconde cause de surprise est que l'expérience permet d'observer et d'analyser le phénomène perceptif de *contraste simultané*, que certains élèves repèrent et cela d'autant mieux que l'obscurité de la salle n'est pas réalisée. En effet, dans ce cas, et particulièrement avec une seule source, la couleur perçue ne peut pas être mise en relation de façon simple avec la seule composition de la lumière reçue.

Cette séance a donc deux objectifs : d'une part, introduire la soustraction d'une lumière colorée par rapport à la lumière blanche et d'autre part, montrer les limites du modèle introduit dans la séance précédente, la correspondance entre couleur perçue et composition de la lumière reçue n'étant pas biunivoque.

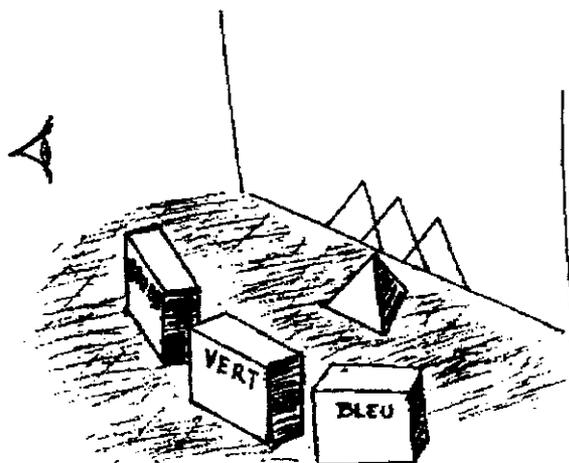
2. Une activité de prévision pour introduire la soustraction de lumière

Les outils conceptuels d'analyse des ombres colorées ont été introduits lors de la séance précédente :

- l'ombre d'un objet sur un écran est l'absence de lumière sur cette plage,
- là où s'ajoutent des lumières colorées, les lois de l'addition de lumières sont connues.

La prévision de l'aspect de l'écran (voir figure 3 et encadré 3) peut être menée avec ces seuls éléments, si l'on suppose la salle complètement obscure.

Figure 3



Encadré 3

Ombres colorées sur un écran blanc**Prévision**

Placez le tétraèdre sur la base et les trois sources [RVB] au voisinage de la perpendiculaire à une face et dans l'ordre rouge, vert, bleu sans les allumer. Placez un écran blanc vertical derrière T à l'opposé des sources.

- 1 - Dessinez sur une feuille de papier blanc ce que vous pensez voir :
 - si on allume la lampe rouge seule,
 - si on allume la lampe verte seule,
 - si on allume la lampe bleue seule.

- 2 - Que verrez-vous sur l'écran si on allume deux des lampes ? (rouge et vert par exemple)

Dessinez ce que vous pensez voir en précisant les différentes couleurs et les positions des ombres sur une feuille de papier blanc placée sur l'écran vertical.

- 3 - Que verrez-vous sur l'écran si on allume les trois lampes ? Dessinez ce que vous pensez voir (formes, positions et couleurs) en justifiant vos prévisions.

Observation et Vérification

- 1 - Allumez les trois sources. Vos prévisions sont-elles vérifiées ?
Faites un schéma et proposez une interprétation.
Modifiez l'ordre des lampes. Représentez les différentes combinaisons.
- 2 - Allumez deux sources.
Refaites un schéma (si l'observation ne correspond pas à vos prévisions) et proposez une interprétation de ce qu'on voit.
- 3 - Allumez une seule source.
Observez la couleur de l'ombre. Cette couleur correspond-elle à la lumière reçue par l'observateur, venant de cette plage ? Si non, comparez avec la couleur de la source observée directement sur fond noir. Pouvez-vous donner une explication ?
Pour accentuer ce phénomène, faites une ombre de T avec la lumière rouge et éclairez l'écran avec une lumière blanche (mais la lumière ambiante suffit !).

Avec une source, seule la disposition des éléments du montage est à prendre en compte.

Avec deux sources de lumières colorées, il est nécessaire de raisonner en tenant compte de deux phénomènes :

- sur le fond, les lumières colorées venant de sources différentes s'ajoutent, sont diffusées par l'écran et parviennent dans l'oeil de l'observateur,
- pour chaque plage correspondant à l'ombre, l'une des lumières arrive alors que l'autre est arrêtée (ou soustraite par l'obstacle).

Lorsqu'on allume les trois sources, rouge, verte et bleue, correctement réglées, le fond paraît blanc. Chaque plage colorée de l'écran reçoit une ou deux lumières colorées.

L'interprétation de la couleur d'une plage d'"ombre" de l'une des sources peut se faire selon deux modes de raisonnement : par exemple, la plage jaune est celle qui reçoit et diffuse les lumières rouge et verte, mais c'est aussi celle où manque la lumière bleue par rapport au fond qui reçoit les trois lumières. On note que la couleur perçue est complémentaire de la couleur soustraite de la lumière blanche.

La luminance de la plage jaune est ainsi le résultat de la soustraction de la luminance en lumière bleue par rapport à la luminance en lumière blanche.

$$L_J \leq L_R + L_V \leq L_W - L_B$$

$$L_C \leq L_V + L_B \leq L_W - L_R$$

$$L_M \leq L_B + L_R \leq L_W - L_V$$

Cette expérience est l'occasion d'exercices de combinatoire additive et soustractive sur les lumières colorées reçues et diffusées par l'écran blanc et sur les luminances de chaque plage.

3. Voir les couleurs : contraste simultané

Lorsque la prévision, l'observation et l'interprétation discutées en groupe ont convaincu chacun de la composition de la lumière qui provoque chaque couleur, une observation plus attentive des ombres obtenues, par exemple avec la lumière rouge et la lumière verte, montre que le « rouge » et le « vert » des plages vues sur fond jaune ne sont pas perçus de la même teinte que celle des filtres vus sur fond noir. Le « rouge » sur l'écran se nuance de bleu et paraît plus « magenta » et le « vert » paraît « cyan » (bleu vert).

Cet effet perceptif, appelé contraste simultané par Chevreul (1839), est encore souvent qualifié d'illusion. Il est observé dans le cas de deux sources avec des lumières de couleurs vives et proches des complémentaires. Il peut l'être aussi avec des lumières de couleurs moins contrastées (par exemple en lumière du coucher du soleil ou avec la flamme d'une bougie, les ombres sont bleutées). Il est particulièrement observable avec une seule source de lumière colorée, lorsque la lumière blanche ambiante est importante. Alors que, dans chaque cas, la plage d'ombre ne reçoit et ne diffuse que la lumière blanche, l'ombre de l'objet en lumière rouge paraît cyan ; en lumière bleue, elle paraît jaune et en lumière verte, elle paraît rouge magenta.

Le phénomène de contraste simultané est une caractéristique générale de la perception des couleurs, commune à tous les observateurs humains, que l'on peut énoncer ainsi :

La couleur perçue d'une forme dépend de la couleur du fond sur lequel elle apparaît : le système visuel induit la couleur complémentaire du fond sur la plage visée.

Ainsi la composition de la lumière venant d'une plage donnée et reçue par l'observateur ne suffit pas à expliquer la couleur perçue pour cette plage. C'est une situation où la couleur ne peut s'interpréter qu'en intégrant le traitement par l'oeil et le système visuel de l'information transportée par la lumière (Lindsay & Norman, 1980).

2.3.2. Séance n°3 : analyse spectrale des lumières blanches et colorées

L'analyse de la lumière blanche ou colorée est faite grâce à l'observation du spectre obtenu avec un réseau. Les fentes sources sous cache-diapositive que nous utilisons⁴ sont réalisées en collant des bandes des filtres colorés utilisés dans les séances précédentes, de telle sorte que les observations du spectre de la lumière blanche de référence et des spectres des lumières colorées puissent être simultanées.

L'observation et l'analyse des spectres permettent d'introduire les notions suivantes.

1. Lumière blanche, bandes spectrales et couleurs spectrales

Les lumières rouge, verte et bleue correspondent chacune à une bande spectrale d'un tiers environ du spectre de la lumière blanche. L'addition de ces trois lumières peut redonner de la lumière blanche, ce qui justifie le découpage simplifié en trois bandes (voir schéma 1).

La décomposition de chacune de ces bandes larges en bandes de plus en plus étroites conduit à la notion de radiation monochromatique, caractérisée par une valeur de longueur d'onde λ . Chacune d'elle produit sur l'observateur une sensation de couleur différente, qualifiée de couleur spectrale ou pure, allant du violet ($\lambda = 400$ nm) au rouge ($\lambda = 700$ nm).

2. Le rôle du filtre et ses caractéristiques

Le filtre est un objet transparent qui *soustrait* une partie des radiations contenues dans la lumière blanche incidente. La soustraction ici a pour origine le phénomène d'absorption sélective liée à la structure du matériau utilisé. Le filtre peut modifier le flux lumineux, la répartition spectrale relative, ou l'un et l'autre, du rayonnement qui le traverse.

Un matériau transparent coloré est caractérisé par

1. son facteur de transmission, τ (pour un rayonnement incident de composition spectrale, polarisation et répartition géométrique données) : rapport du flux lumineux transmis au flux lumineux incident dans les conditions données,

2. le facteur spectral de transmission, $\tau(\lambda)$: facteur de transmission en fonction de la longueur d'onde,

3. le facteur spectral d'absorption $\alpha(\lambda)$: rapport du flux lumineux absorbé au flux incident, en fonction de la longueur d'onde,

4. la densité optique $D = -\log_{10} \tau$

Quelques exemples de courbes indiquant soit le facteur de transmission spectrale τ en fonction de la longueur d'onde, soit la densité optique (filtres Kodak) en fonction de la longueur d'onde, sont données en annexe 3.

⁴ . UTRILLA J.P., 1988, Que la lumière soit, et la lumière fut, *BUP* n° 703, p. 501-504 ou GOUBE A. et LEGRAND J.F., 1987, Couleurs et spectres d'absorption, *BUP* n°693, p. 509-513.

3. Le spectre d'une lumière et la couleur perçue

Un jeu de superposition de filtres de couleurs différentes permet de faire des prévisions qualitatives, en raisonnant sur des soustractions successives de bandes de radiations par rapport à la lumière incidente. La couleur perçue correspond à la bande transmise et reçue par l'observateur.

4. La superposition de filtres identiques et la saturation de la couleur

La superposition de matériaux identiques transparents (feuilles teintées pour rétroprojecteur par exemple) sur la même fente source en une, deux, trois et quatre épaisseurs montre comment varie le phénomène d'absorption avec l'épaisseur traversée par la lumière ⁵.

L'étude quantitative simplifiée (chaque épaisseur de filtre absorbe la même proportion de la lumière incidente pour une bande spectrale donnée) et l'observation des spectres sont mis en relation avec l'évolution de la couleur perçue.

Une seule épaisseur laisse passer de la lumière sur l'ensemble du spectre, ce qui donne une couleur lavée de blanc, c'est-à-dire *désaturée* (par exemple pour un filtre jaune laissant passer 20% dans la bande bleu, 90% dans le rouge et le vert, deux couches ne laissent passer que 4% dans le bleu et 81% dans le rouge et le vert). Lorsque plusieurs feuilles sont superposées, la largeur de la bande spectrale transmise diminue en même temps que s'accroît le contraste entre la bande lumineuse et la bande sombre : la couleur perçue est plus *pure*.

Cette observation permet de revenir sur le troisième paramètre perceptif de la couleur : la *saturation*, les deux premiers étant la teinte et la luminosité.

Des adjectifs, tels pur, saturé, ou au contraire lavé de blanc, ou encore vif (= clair et saturé), pâle (= clair et lavé), profond (= foncé et saturé), rabattu (= lavé et foncé), sont mis en relation avec les spectres observés (annexe 1.4.). La saturation maximum corespond à la sensation produite par une radiation monochromatique.

A l'issue de cette séance, les caractéristiques de la couleur perçue sont à nouveau liées principalement à la composition de la lumière reçue. Une analyse détaillée à partir de filtres de caractéristiques connues indique comment varient les paramètres perceptifs de teinte, saturation et luminosité avec les quantités relatives des différentes bandes de radiations.

Le raisonnement en termes de chaîne est particulièrement utile dans l'analyse de ces situations.

⁵ La loi de Beer-Lambert indique que la densité optique est proportionnelle à l'épaisseur.

2.3.3. Séance n°4 : couleur des objets opaques

1. Difficultés des élèves

La question suivante posée à différents moments de la séquence met en évidence les difficultés des étudiants à envisager la diffusion de lumière et la soustraction de lumière par les matériaux colorés opaques.

La question

4. Entrant dans une salle sombre, un spectateur peut-il faire la différence entre un décor rouge éclairé par une lumière blanche et un décor blanc éclairé en lumière rouge ?

oui

non

je ne sais pas

Justifiez votre réponse :

Les réponses

La réponse correcte fait intervenir les éléments suivants :

- à la notion de **diffusion** de lumière rouge par le décor blanc s'ajoute l'idée **d'absorption**, donc de tri, par le décor rouge dans la lumière blanche incidente ;

- la lumière que reçoit l'observateur a sensiblement la **même composition dans les deux cas et produit donc la même sensation de couleur.**

Ce sont ces éléments d'explication que nous recherchons dans les justifications des élèves en les classant en catégories exclusives. Celles-ci sont de deux types :

1. c'est la même composition de la lumière, l'idée de tri est présente, l'observateur ne fait pas la différence :

« en effet en lumière blanche l'écran rouge ne renverra que le rouge, le vert et le bleu seront absorbés. De même un décor blanc éclairé en lumière rouge ne renverra que du rouge » ;

2. la couleur de la lumière s'ajoute à la couleur du décor, l'idée de tri n'est pas présente, que l'observateur fasse ou non la différence :

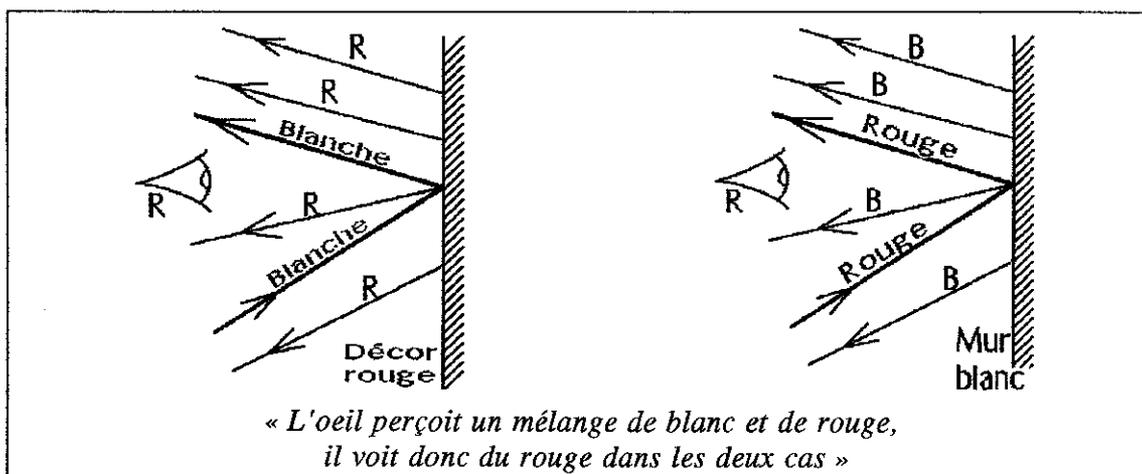
« un décor rouge reste rouge en lumière blanche, alors qu'un décor blanc éclairé en lumière rouge sera rouge + blanc = rose, le rouge est moins intense ».

ou encore

" il ne verra pas de différence, c'est le même mélange "

Cette dernière affirmation, associée au schéma suivant, laisse un doute sur l'origine de la "couleur" renvoyée par l'objet.

Schéma 6. Décors et diffusion de la lumière



nombre d'élèves	situation / enseignement	justifications type 1	justifications type 2	aucune ou autres
43	avant	5%	55%	40%
18	après	60%	0%	40%

La tendance majoritaire avant enseignement est de raisonner dans cette situation en ajoutant la couleur de la lumière à la couleur de l'objet. Cette difficulté à raisonner en termes de soustraction, disparue momentanément après enseignement, est toutefois très résistante. Elle réapparaît dans des situations analogues, comme on le verra dans la suite.

2. Action sur la lumière : analogie entre pigment et filtre

Pour répondre à la question que les élèves se posent dès qu'ils perçoivent la différence entre mélanges de lumières et mélanges de matières « *Mais les pigments en peinture, comment ça marche ?* », nous avons choisi de montrer qu'un corps opaque et un filtre, choisis de même teinte, ont une action analogue sur la lumière blanche qui les éclaire.

Les élèves disposent de morceaux de filtres colorés utilisés en éclairage de scène ; les teintes sont choisies très proches de celles des pigments *primaires* de la palette du peintre, puisque les élèves connaissent bien les résultats de leurs mélanges.

Les spectres des lumières transmises par les filtres jaune, magenta et cyan ont été caractérisés comme couvrant les deux tiers du spectre visible. Il en va de même pour les lumières diffusées par les pigments, ce qui peut être observé à l'aide d'un spectroscope à main.

Mais le spectroscope n'est pas indispensable. Lorsqu'on superpose les filtres deux à deux et lorsqu'on mélange les pigments deux par deux, on observe les mêmes teintes⁶. Dans chaque cas, la lumière reçue par l'observateur ne comporte

⁶. On néglige, pour les filtres, la lumière diffusée par le filtre superficiel, et pour les pigments, la lumière qui n'est transformée que par un type de pigments.

plus que le tiers de la bande spectrale visible, ce qui correspond aux couleurs "tiers de spectre" rouge, vert et bleu.

Cette équivalence phénoménologique, en référence à la perception visuelle, amène à proposer un même modèle de fonctionnement par rapport à la lumière, pour les corps colorés transparents et opaques :

la lumière blanche pénètre dans le matériau,
 le matériau transforme la lumière reçue,
 il soustrait totalement ou partiellement une bande de radiations qui lui est caractéristique : c'est l'absorption sélective ;
 il diffuse ou transmet le reste, qui est reçu par l'observateur.

L'action de soustraction sur la lumière blanche, pour chaque pigment, peut être caractérisée par

1. le facteur de réflexion ρ (pour un rayonnement incident de composition spectrale, polarisation et répartition géométrique données) : rapport du flux lumineux réfléchi au flux lumineux incident, dans les conditions données,

2. le facteur spectral de réflexion, $\rho(\lambda)$: facteur de réflexion en fonction de la longueur d'onde,

3. le facteur spectral de luminance, $\beta(\lambda)$: rapport de la luminance énergétique (ou lumineuse) du corps à celle du diffuseur parfait par réflexion ou par transmission irradié (ou éclairé) dans les mêmes conditions en fonction de la longueur d'onde,

L'analyse spectrale est introduite non pour avoir des informations sur la nature du matériau, mais pour caractériser l'action du matériau sur la lumière.

3. Synthèse soustractive

Les règles des mélanges de pigments et de colorants sont alors mises en relation avec la composition de la lumière reçue par l'observateur : les mélanges sont moins lumineux que chacun des pigments, la teinte et la saturation évoluent en fonction de la position et de la largeur de la bande spectrale restant après soustraction par chaque pigment du mélange.

Ce sont les lois de la *synthèse soustractive*. On comprend pourquoi les pigments *primaires* choisis par les peintres ou les encres des imprimeurs sont jaune, magenta ou cyan : ils laissent passer deux tiers du spectre de la lumière blanche qui les éclaire et leurs mélanges donnent une gamme étendue de couleurs. Des pigments rouges, verts et bleus, ne laissant passer qu'un tiers du spectre de la lumière blanche, mélangés deux à deux, donnent une couleur très sombre, proche du noir.

Les deux procédés de création de couleurs, qualifiés d'additif et de soustractif, se réfèrent tous les deux à la lumière : addition de lumières reçues par l'oeil de l'observateur et soustraction de lumière par la matière.

4. Choix des questions pour traiter des difficultés spécifiques

Nous proposons ensuite une activité de prévision (encadré 4) pour revenir sur l'idée de diffusion par un écran coloré (cas d'un papier teinté par un pigment ou un colorant) de lumière colorée de même couleur. Les notions de tri dans la lumière incidente et de diffusion, sur lesquelles nous insistons, demeurent difficiles pour les étudiants (schéma 6).

A une question du type « *de quelle couleur paraît un écran bleu éclairé en lumière rouge ?* », les étudiants répondent en ajoutant les couleurs comme s'il s'agissait de pigments : par exemple, « *rouge + bleu = violet* », alors qu'un écran bleu ne diffuse que la lumière bleue, s'il en reçoit, et paraît bleu ou noir.

Mais dans les faits, les étudiants ont raison. Lors de l'observation, si la salle d'expériences n'est pas parfaitement obscure, de la lumière bleue est diffusée par le papier provenant de la lumière ambiante. Le papier bleu, qui n'est sans doute pas parfaitement absorbant pour la lumière rouge, va diffuser un peu de lumière rouge : le papier va paraître magenta foncé ou violet, puisqu'il diffuse un peu de lumière bleue et un peu de lumière rouge.

Dans cette situation classiquement étudiée, nous risquons de vérifier, par l'observation, des réponses obtenues avec des raisonnements faux.

C'est pourquoi, nous ne posons pas la question en termes de couleur, puisqu'elle induit une réponse fautive. Nous demandons une réponse en termes de luminosités comparées (clair ou foncé), donc de contraste et non de teinte.

Éclairés par une lumière rouge, la face avant du tétraèdre et l'écran rouge ont des luminosités fortes, l'ombre du tétraèdre apparaît très sombre : le contraste est fort entre la zone éclairée et la zone d'ombre. De plus, si l'écran est placé de telle sorte que la lumière qu'il diffuse atteigne les faces arrière du tétraèdre, ces faces ont également des luminosités fortes.

Au contraire, la lumière rouge, éclairant un écran bleu, est absorbée par le papier bleu, l'écran et l'ombre présentent peu de différence : le contraste est faible. Les faces arrière du tétraèdre ne sont pas éclairées.

L'observation brute, dans des conditions de réalisation peu favorables, risque de renforcer les raisonnements faux. Il apparaît d'autant plus important d'avoir mené, avant vérification, une analyse en « tout ou rien » mettant en oeuvre un raisonnement correct, qui pourra être nuancée ensuite devant l'observation de l'expérience.

Encadré 4

**Diffusion par les corps opaques
Ombres sur un écran coloré**

On éclaire avec une lumière colorée l'objet blanc T placé devant un écran coloré. On compare maintenant, sur l'écran, la luminosité de l'ombre de T par rapport au reste de l'écran (la face éclairée de l'objet T sert de référence).

*** Prévisions**

a - l'écran, noir à la lumière du jour, est éclairé en lumière rouge.

Verra-t-on nettement l'ombre sur l'écran ? oui non

Expliquez :

.....

.....

b - l'écran, rouge à la lumière du jour, est éclairé successivement avec une lumière rouge, verte ou bleue. Dans chaque cas, prévoir la luminosité (forte ou faible) des deux zones de l'écran, et indiquer si leur contraste est fort ou faible.

Lumière	Zone éclairée	Zone d'ombre	Contraste
rouge			
verte			
bleue			

Justifiez votre réponse :

.....

.....

.....

*** Vérifications**

Faites l'expérience. Notez vos observations et commentez. Comment un objet opaque coloré agit-il sur la lumière qu'il reçoit ?

.....

.....

.....

2.4. Phase 3 : réinvestissement et activités de synthèse

2.4.1. Séance n°5 : couleur des objets en lumières blanche et colorée

La couleur des objets de notre environnement quotidien est une propriété attribuée à l'objet éclairé en lumière blanche. Elle est mémorisée et perçue comme constante, indépendamment de la qualité de cette lumière. Pourtant, celle-ci est variable au cours de la journée. Ce phénomène, décrit par les psychologues sous l'appellation « *constance de la couleur* », contribue à renforcer l'idée que la couleur est une propriété de l'objet.

L'objectif de cette séance est de récapituler les facteurs qui influent sur la couleur des objets : le rôle de la lumière incidente, qui peut être de la lumière colorée, la nature de l'objet et son interaction avec la lumière.

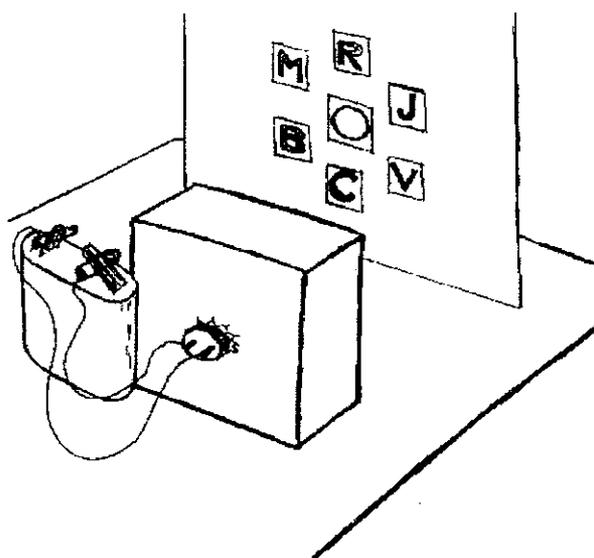
1. Préviation

L'activité proposée est une préviation de ce qu'on verra, donc nécessite de réinvestir les notions relatives au concept de couleur acquises au préalable. Elle se présente comme un exercice de synthèse où il faut **maîtriser tous les éléments de la chaîne d'analyse pour donner la bonne réponse**.

L'exercice (figure 4 et encadré 5) consiste d'abord en une préviation mettant en jeu un raisonnement que les étudiants sont invités à expliciter ensuite verbalement ou à l'aide de schémas. La question est posée en termes : « visible ou non visible », en référence à la lumière diffusée et reçue par l'observateur.

Chaque lettre de 1,5 cm environ est choisie de couleur le plus saturée possible, c'est-à-dire absorbant un ou deux tiers du spectre de la lumière blanche. Toutefois, comme dans l'expérience précédente, l'absorption sélective ne se fait pas par tout ou rien.

Figure 4



Encadré 5

Couleur des objets en lumière blanche et en lumière colorée
Tableau coloré sur fond noir

On observe sur le tableau noir, éclairé en lumière blanche, des objets (lettres) de couleurs Rouge, Jaune, Vert, Cyan, Bleu, Magenta et un rOnd blanc.

*** Prévion : que verra-t-on ?**

a - si on éclaire le tableau avec de la lumière ROUGE,

lettres visibles : ; non visibles :

b - même question pour les lumières suivantes :

lumière	lettres visibles	non visibles
VERTE		
BLEUE		
JAUNE		

c - sur un exemple de votre choix, proposez un schéma traduisant la chaîne des transformations subies par la lumière et justifiez votre réponse.

*** Vérifications et conclusions**

lumière	lettres visibles	non visibles
VERTE		
BLEUE		
JAUNE		

.....

2. Un raisonnement utilisant tous les éléments de la chaîne

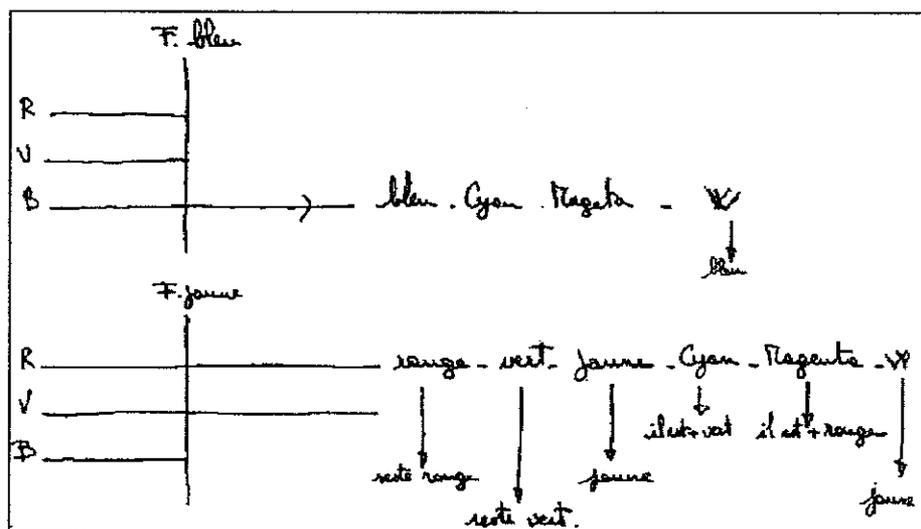
Pour une prévision correcte, il est nécessaire de mener un raisonnement en termes de lumière, fondé sur la composition de la lumière reçue par l'observateur après deux absorptions successives : par le filtre, puis par l'objet.

Les variables dans cette question sont la composition simplifiée de la lumière incidente et la composition de la lumière diffusée après interaction avec l'objet.

Comme on l'a vu précédemment en introduction de la séance 4, les étudiants raisonnent souvent en termes d'addition de couleurs, comme s'il s'agissait de deux pigments mélangés (*rouge + vert = marron*, si la lettre rouge est éclairée par la

lumière verte) ou encore comme s'il s'agissait de deux lumières ajoutées (*rouge + vert = blanc ou jaune*). A l'analyse de la situation, ils substituent l'application de règles. Là aussi, la question est posée d'abord en termes de visibilité, liée à la luminosité, de façon à inviter les étudiants à envisager la lumière diffusée et, en amont, les différentes étapes de transformation de la lumière.

Schéma 7. Un exemple de prévision et de justification correctes.



3. Vérification et observation

L'analyse permet de prévoir non seulement la luminosité, mais également la teinte perçue. La vérification, satisfaisante dans de bonnes conditions d'obscurité, est convaincante pour les étudiants et valide le raisonnement en termes de composition de la lumière arrivant jusqu'à l'oeil. Ce même raisonnement permet aussi l'explication des écarts entre prévision et vérification, lorsque la lumière blanche ambiante joue un rôle non négligeable.

2.4.2. Retour sur quelques aspects techniques

L'objectif de la séquence est de donner aux étudiants des outils de raisonnement applicables à l'analyse de situations techniques de création ou de reproduction d'images colorées.

L'une des techniques les plus utilisées est l'impression en quadrichromie. Nous donnons en annexe un texte de vulgarisation extrait du journal « Le Monde » sur cette technique (voir annexe 4). Il sert de support écrit pour dégager les différentes étapes de mise en oeuvre du procédé.

En utilisant l'idée de chaîne de transformation sur la lumière, les différentes phases du procédé sont analysées. En particulier, l'action de soustraction sur la lumière incidente est reprise ici à propos des filtres rouge, vert et bleu de sélection trichrome. On dégage le point important suivant : les clichés tramés obtenus à partir des négatifs résultant de la sélection trichrome par des filtres rouge, vert et bleu sont respectivement utilisés pour l'encrage du papier en cyan, magenta et jaune. Superposition et juxtaposition des taches correspondent donc à la production de couleurs aussi bien par synthèse soustractive qu'additive.

Ce texte permet d'évoquer l'évolution des procédés de sélection d'une part, et d'autre part, l'évolution des caractéristiques physico-chimiques des encres choisies comme primaires, depuis l'invention de la trichromie par Le Blon au début du XVIII^{ème} siècle. Ainsi il devient possible aux étudiants de mettre en relation les termes de couleur spécifiques des imprimeurs (jaune, bleu, rouge) avec ceux utilisés dans la séquence (jaune, cyan, magenta) et de donner un sens au schéma proposé par l'auteur de l'article.

D'autres problèmes techniques, que rencontrent les étudiants aujourd'hui, comme la reproduction sur papier des images numériques, peuvent aussi être abordés et analysés avec le noyau de concepts et d'outils de raisonnement qui ont été introduits.

BIBLIOGRAPHIE

- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (AFNOR) (1989), *Couleurs - colorimétrie*, Paris, AFNOR.
- BUSER P., IMBERT M. (1987), *Vision*, Hermann, Paris.
- CHAUVET F. (1993), « Conceptions et premiers essais d'une séquence sur la couleur », *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 750, p. 1-26.
- CHAUVET F. (1994), *Construction d'une compréhension de la couleur intégrant sciences, techniques et perception : principes d'élaboration et évaluation d'une séquence d'enseignement*, Thèse Université Paris 7 (LDPES).
- CHEVREUL M.-E. (1839), *De la loi du contraste simultané des couleurs*, Pitois-Levrault, 1839, puis diverses rééditions et traductions.
- DELORME A. (1982), *Psychologie de la perception*, éd. Etudes vivantes, Montréal.
- FEYNMAN R. (1970), *La Mécanique*, tome 1, Interéditions, Paris.
- JOUANISSON R. (1985), « Une expérience pluridisciplinaire : polyèdres et synthèse additive des couleurs », *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 676, p. 1351-1360.
- KAMINSKI W. (1989), « Conceptions des enfants (et des autres) sur la lumière », *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, p. 973-996.
- KOWALISKI P. (1978), *Vision et mesure de la couleur*, Masson, Paris.
- LINDSAY P.H., NORMAN D.A. (1980), *Traitement de l'information et comportement humain, une introduction à la psychologie*, Vigot, Montréal.
- WILLIAMSON S.J., CUMMINS H. Z., (1983), *Light and color in nature and art*, John Wiley & Sons, New York.

ANNEXES

1. RAPPELS DE PHOTOMÉTRIE DES LUMIÈRES COLORÉES

Mesurer la couleur nécessite de définir des grandeurs et des méthodes pour mesurer la lumière en référence à la vision humaine.

1.1. La lumière

Lorsqu'une source de lumière rayonne de l'énergie, une partie seulement de ce rayonnement provoque la vision.

La gamme des radiations électromagnétiques auxquelles l'œil humain est sensible constitue "la lumière visible". Cette gamme correspond au maximum de la distribution spectrale d'énergie de la source de lumière habituelle qu'est le soleil. Les longueurs d'onde de la lumière visible sont prises généralement entre 400 et 700 nm (figure 1). Les sources de lumière émettent également des rayonnements dont les longueurs d'onde sont supérieures à celles du rayonnement visible, c'est le rayonnement infrarouge et des rayonnements de longueurs d'onde inférieures, c'est le rayonnement ultraviolet.

D'autre part, dans le domaine visible, la sensibilité de l'œil varie avec la longueur d'onde. Elle est presque nulle au-delà de 700 nm et en deçà de 400 nm et est maximale pour 555 nm.

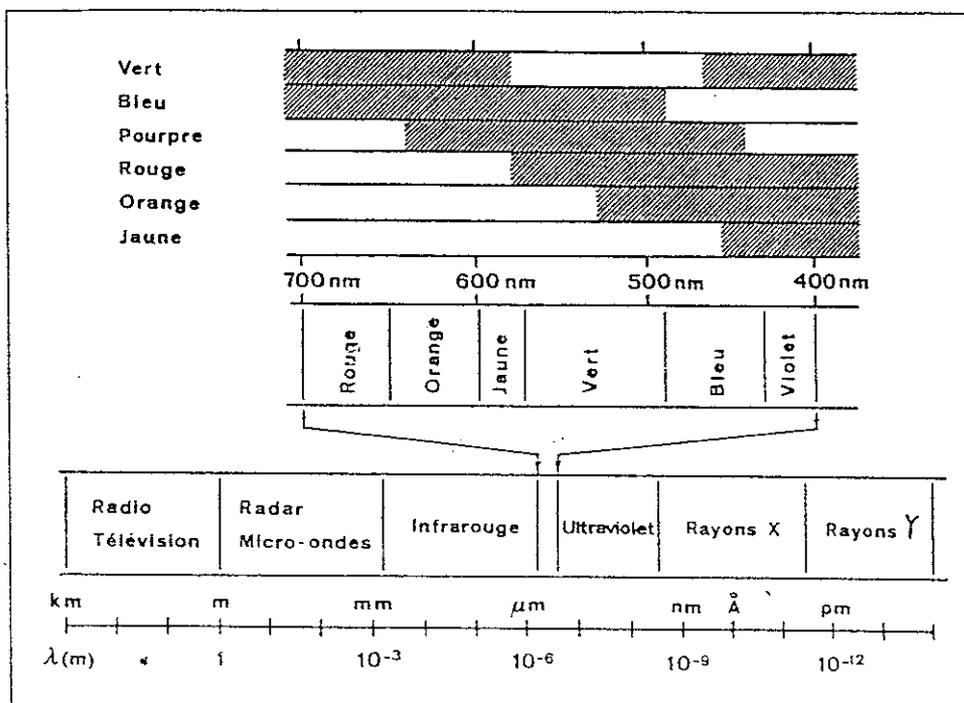


Figure 1. Domaines des radiations électromagnétiques. L'échelle des longueurs d'onde est logarithmique, c'est-à-dire que pour chaque intervalle, la valeur est multipliée par 10. Le domaine très étroit de la lumière visible a été agrandi afin de pouvoir y inscrire la couleur perçue en fonction de la longueur d'onde (l'échelle est linéaire). Un schéma très simplifié de production de la couleur par absorption de rayonnement (zone hachuré) est présenté.

1.2. Grandeurs énergétiques et lumineuses

A chaque grandeur énergétique (mesurable par l'énergie transportée) correspond une grandeur photométrique ou lumineuse. Nous donnons dans le tableau ci-dessous les quatre grandeurs photométriques utiles et leur correspondance avec les grandeurs énergétiques.

Tableau de correspondance

Grandeurs énergétiques		Grandeurs lumineuses	
Nom Unité	Symbole	Nom Unité	Symbole
Flux énergétique watt (W)	Φ_e	Flux lumineux lumen (lm)	Φ_v
Intensité énergétique watt/stéradian (W/sr)	I_e	Intensité lumineuse candela (lm/sr ou cd)	I_v
Luminance énergétique watt/stéradian.m ² (W/sr.m ²)	L_e	Luminance lumineuse candela/m ² (lm/sr.m ² ou cd/m ²)	L_v
Éclairement énergétique watt/m ²	E_e	Éclairement lumineux lumen/m ² ou lux (lm/m ² ou lux)	E_v

Les grandeurs énergétiques sont notées avec le symbole e et les grandeurs lumineuses avec le symbole v (visuel)

Entre les grandeurs énergétiques et les grandeurs photométriques, il existe un rapport qui ne dépend que des unités et de la composition spectrale de la lumière étudiée. Ce rapport K est appelé efficacité lumineuse du rayonnement considéré. K est nul pour tout rayonnement invisible.

La réponse de l'œil est instantanée. L'œil est donc sensible à un débit d'énergie, c'est-à-dire à un flux (et non à l'accumulation comme la surface sensible en photo). **Le flux lumineux**, quantité d'énergie visible par unité de temps, s'exprime en lumen. La définition du lumen ci-dessous détermine la valeur maximale K_m de l'efficacité lumineuse :

« le lumen est le flux lumineux d'une radiation monochromatique de fréquence⁷ $540 \cdot 10^{12}$ Hz dont le flux énergétique est 1/683 W. »

⁷ La fréquence de $540 \cdot 10^{12}$ Hz correspond à la longueur d'onde de 555 nm, dans le jaune vert.

Le flux lumineux, pour chaque longueur d'onde est donc lié au flux énergétique et à l'efficacité lumineuse spectrale par la relation :

flux lumineux = efficacité lumineuse spectrale × flux énergétique

$$\Phi_v = 683 V_\lambda \Phi_e,$$

où la fonction V_λ définit l'observateur de référence photométrique (voir § 1.3.).

L'**éclairage** E_v mesure la quantité de lumière qui arrive sur une surface, c'est-à-dire le flux lumineux par unité de surface. Il se mesure en lux.

La répartition de la lumière autour d'une source ponctuelle est caractérisée par l'**intensité lumineuse** I dans une direction donnée. C'est le flux lumineux transporté dans un cône très petit. La dimension d'un cône se mesure en stéradian. L'intensité se mesure en candéla, égale à 1 lumen par stéradian.

La grandeur photométrique associée à la sensation de luminosité plus ou moins grande d'une surface, qu'elle soit émettrice ou diffusante, est la **luminance**. Dans une direction donnée, la luminance est le rapport de l'intensité de la source par l'aire de la surface apparente de la source dans cette direction. Elle se mesure en cd/m^2 .

La luminance d'une surface diffusante dépend non seulement du flux reçu, mais de l'aptitude de la surface à réfléchir (diffuser) la lumière, c'est-à-dire du facteur de réflexion. Une surface dont la luminance ne dépend pas de la direction d'observation est parfaitement diffusante (ou parfaitement mat): elle suit la loi de Lambert. Elle paraît également lumineuse quelque soit la direction sous laquelle elle est vue.

1.3 Courbes de sensibilité spectrale

Les deux courbes ci-dessous V_λ et V'_λ sont les fonctions spectrales des visions photopiques et scotopiques de l'observateur standard de la CIE⁸. Elles indiquent les valeurs de l'efficacité lumineuse relative pour chaque longueur d'onde et constituent une norme définissant l'œil humain.

La courbe en traits pleins correspond à la vision de jour (la seule qui concerne la vision des couleurs), celle en tirets à la vision de nuit.

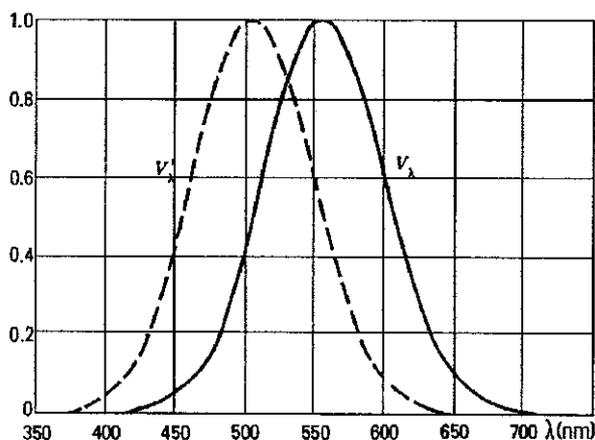


Schéma 3. Courbes de sensibilité relative de l'observateur humain C.I.E.. La courbe en traits pleins correspond à la vision de jour, celle en tirets à la vision de nuit.

Différentes méthodes de comparaison (l'œil est un instrument de « zéro ») ont permis d'établir les valeurs relatives de l'efficacité lumineuse spectrale caractérisant la sensibilité de l'œil humain.

On postule que les sensibilités spectrales visuelles pour chaque radiation sont dans le rapport inverse de leurs énergies respectives. Par exemple, pour que deux plages voisines éclairées par des lumières monochromatiques, l'une de longueur d'onde $\lambda_V = 550$ nm et l'autre de longueur d'onde $\lambda_B = 500$ nm, paraissent également lumineuses, les coefficients de sensibilité spectrale doivent être dans le rapport inverse des flux énergétiques incidents (donc des luminances qui sont proportionnelles aux flux),

$$\text{soit } V_{\lambda_B} / V_{\lambda_V} = L_{eV} / L_{eB} = 0,4 / 1$$

$$\text{où } L_{eB} = 2,5 L_{eV}$$

À luminosités égales pour l'observateur et à luminances visuelles égales, la luminance énergétique en lumière bleue est deux fois et demi plus grande que la luminance énergétique en lumière verte.

⁸ Observateur de référence défini par la Commission internationale de l'éclairage en 1924 et adopté par le Bureau international des poids et mesures en 1931.

1.4. Tableau récapitulatif des termes utilisés pour caractériser les couleurs

(Extraits de *Couleurs - colorimétrie*, AFNOR, Paris, 1989.)

CORRESPONDANCE ENTRE LES DIFFÉRENTS VOCABLES SELON LES CONDITIONS D'EMPLOI			
	Termes photométriques et colorimétriques (1)	Termes d'usage courant	
Source)	Luminance lumineuse	intense faible	Luminosité
(Objet)	Facteur de luminance lumineuse	clair foncé	Clarté
Chromaticité	Longueur d'onde dominante ou complémentaire	vert bleu violet pourpre jaune orange rouge	vif pâle profond rabattu Teinte
	pureté colorimétrique	pur (saturé) lavé de blanc (lavé)	Pureté Saturation
		Chromie	

(1) Adoptés par la C.I.E.

2. LEXIQUE DES TERMES D'USAGE COURANT ET TECHNIQUE

Additif (Mélange ... des couleurs). Mélange de couleurs (de lumières colorées⁹) dont la résultante est plus lumineuse que chacune des couleurs de base utilisées. Synonyme : Synthèse additive des couleurs. En anglais : *Additive colour mixture ou Additive colour stimulus synthesis*.

Clarté. L'une des trois dimensions de la couleur de surface allant du noir au blanc. Elle occupe l'axe vertical dans le solide des couleurs.

Constance (perceptive). Maintien des caractéristiques objectives, en dépit de variations de l'information reçue par le système visuel.

Constance de la couleur. Maintien de la tonalité, en dépit de variations de la composition spectrale de l'éclairage.

Constance de la luminosité. Maintien de la luminosité, en dépit de variations de l'intensité d'éclairage.

Contraste simultané. Renforcement subjectif des différences de couleur (contraste chromatique) ou de luminosité. Le contraste chromatique est caractérisé par un renforcement des complémentaires.

Contraste successif. Voir Image consécutive.

Dyschromatopsie. Nom générique utilisé pour décrire les troubles de la vision des couleurs (le daltonisme en est une forme).

Égalisation (des couleurs). Atténuation subjective des différences de couleurs ou de luminosité de stimuli contigus. Lorsque les surfaces concernées sont relativement petites, le contraste simultané fait place à un effet d'égalisation. Synonyme : Effet d'assimilation. En anglais : *Spreading effects*.

Image consécutive. Sensation visuelle qui persiste après l'arrêt de la stimulation. On peut l'observer par différents moyens. L'un des procédés consiste à fixer du regard une forme colorée (stimulus d'inspection) et à regarder ensuite une surface achromatique (stimulus-test). On obtient alors une image complémentaire, c'est-à-dire dont la tonalité est approximativement complémentaire de celle du stimulus d'inspection. L'image consécutive complémentaire n'est que l'un des types d'image consécutive que l'on peut obtenir. L'image consécutive s'explique habituellement par une adaptation ou une fatigue sélective d'éléments rétinien.

Inhibition latérale. Processus par lequel l'excitation de cellules nerveuses entraîne la diminution d'activité des cellules voisines.

Luminance¹⁰. Grandeur photométrique correspondant à la grandeur énergétique appelée luminance énergétique. Sa définition tient compte du fait que le récepteur visuel est inégalement sensible aux rayonnements du spectre. Par définition, c'est une grandeur additive.

⁹. C'est nous qui précisons pour plus de clarté.

¹⁰. Extrait de KOWALISKI P. (1978), *Vision et mesure de la couleur*, Masson, Paris, p. 228.

Luminosité¹¹. Attribut de la sensation visuelle qui permet à un observateur de juger directement d'une différence de sensation lumineuse. La luminosité n'est pas une grandeur additive.

Mémoire (Couleur de). Couleur attachée à un objet familier par l'expérience antérieure et susceptible d'affecter la perception de la couleur d'un objet. En anglais : *Memory colour*.

Perception et sensation. La distinction entre sensation et perception peut prendre plusieurs sens. La perception est conçue comme un composé complexe formé de sensations plus élémentaires. La perception peut représenter l'apport d'une signification aux données de la sensation... Les auteurs contemporains ont tendance à rejeter la distinction entre sensation et perception parce que la sensation pure n'a pas de réalité psychologique.

Processus antagonistes ou opposés (Théorie des). Théorie de la vision des couleurs formulée d'abord par Hering, puis reprise par plusieurs auteurs, notamment Hurvich et Jameson. Suivant cette théorie, la perception des couleurs dépendrait de trois systèmes fonctionnant de façon antagoniste : un système rouge-vert, un système jaune-bleu et un système blanc-noir.

Saturation. L'une des trois dimensions de la couleur variant de l'achromatique au chromatique (du centre au pourtour dans des plans horizontaux dans le solide des couleurs). Synonyme dans le système de Munsell : pureté. En anglais : *Chroma*.

Sensation. Expérience cognitive la plus élémentaire. Selon les empiristes classiques, la perception serait construite à partir des sensations. Cette conception de la relation entre sensation et perception n'est plus guère retenue aujourd'hui.

Soustractif (Mélange ... des couleurs). Mélange de couleur dont la résultante est moins lumineuse que chacune des couleurs de base utilisées. Synonyme : Synthèse soustractive. En anglais : *Subtractive colour mixture, subtractive colour stimulus synthesis*.

Subjectives (Couleurs). Impressions chromatiques produites par un stimulus achromatique. On peut produire de tels effets soit au moyen d'un disque de Benham, soit par un éclairage intermittent.

Surface (Couleur de). Couleur de la lumière réfléchiée par un objet éclairé par une source lumineuse blanche.

Teinte ou Tonalité (chromatique). L'une des trois dimensions de la couleur variant grosso modo avec la longueur d'onde (sauf pour les couleurs extra-spectrales : pourpre et magenta) et définissant la variation circulaire sur des plans horizontaux dans le solide des couleurs. En anglais : *Hue*.

(Extraits de DELORME A. (1982), *Psychologie de la perception*, éd. Etudes vivantes, Montréal.)

¹¹ . Extrait de KOWALISKI P. (1978), *Vision et mesure de la couleur*, Masson, Paris, p. 228.

3. NOTES TECHNIQUES POUR LA RÉALISATION DU MATÉRIEL

- carte à gratter sur laquelle des droites concourantes en O font entre elles des angles de 60°

- feuilles de papier canson noir et de couleur

- bristol blanc pour construire les objets difusants : tétraèdre et pyramide à base hexagonale de hauteur 6 cm environ (voir plan page suivante)

- 5 boîtes de disquettes en carton par groupe (parois externes peintes en noir, bristol blanc diffusant à l'intérieur, filtre amovible sur la face avant, ampoule sur la face arrière)

- papier diffusant placé devant le filtre (rend la source étendue et permet un éclairage uniforme des surfaces des objets)

- petites lampes halogène Osram (4 V, 0.85 A) donnant une lumière plus blanche et plus intense que celle d'une lampe à incandescence normale, alimentées par des piles de 4,5 V (Orbitec Diffusion, 157, rue Ordener, 75018 PARIS)

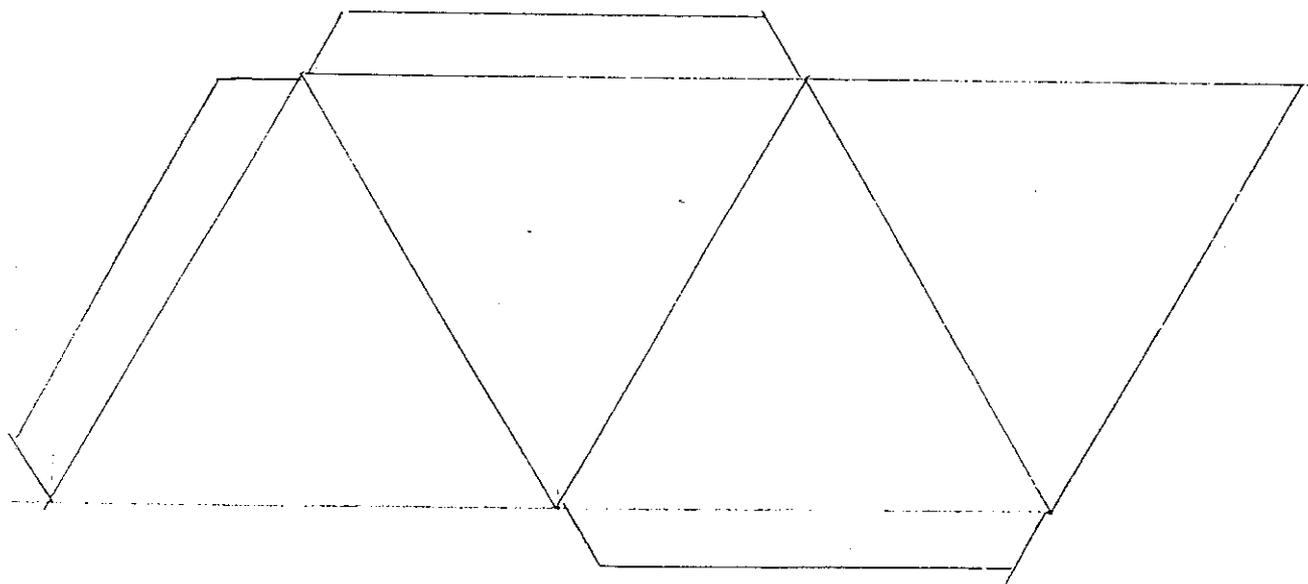
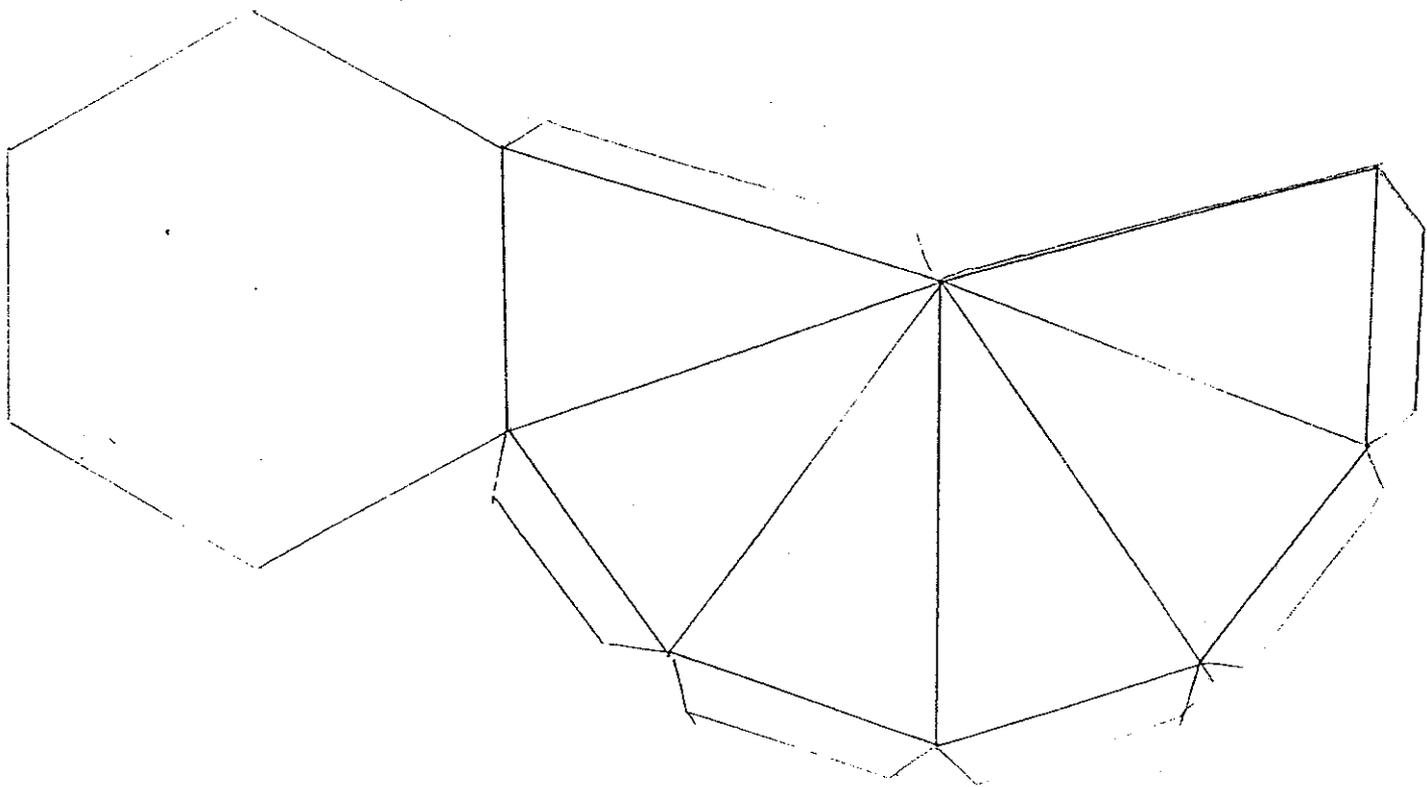
- filtres Jeulin, filtres Kodak ou filtres Lee pour éclairage de scène

- les lettres du tableau coloré sont sorties sur imprimante couleurs

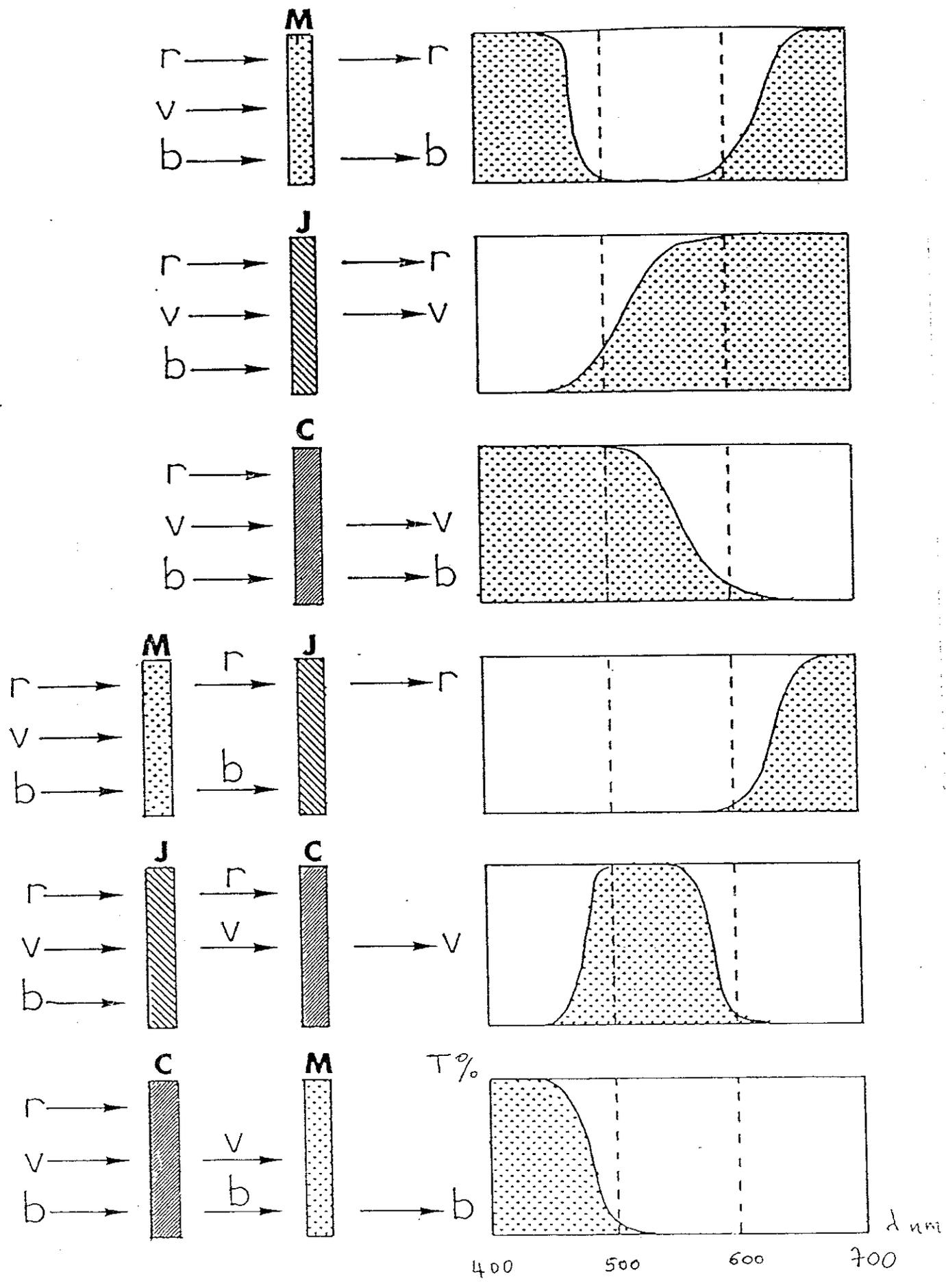
- pigments primaires : gouaches jaune, magenta et cyan

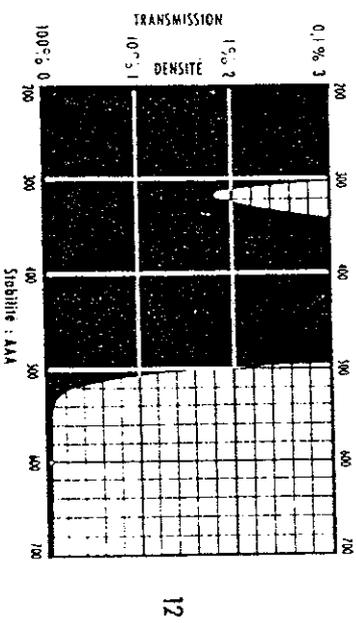
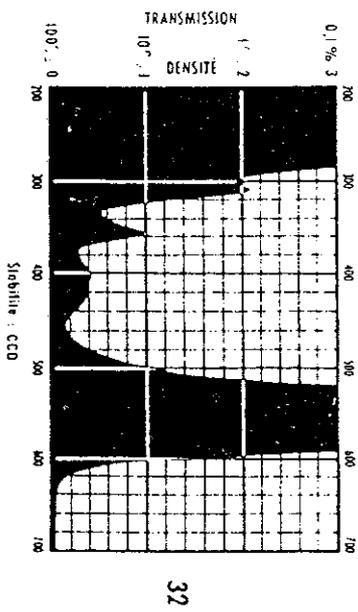
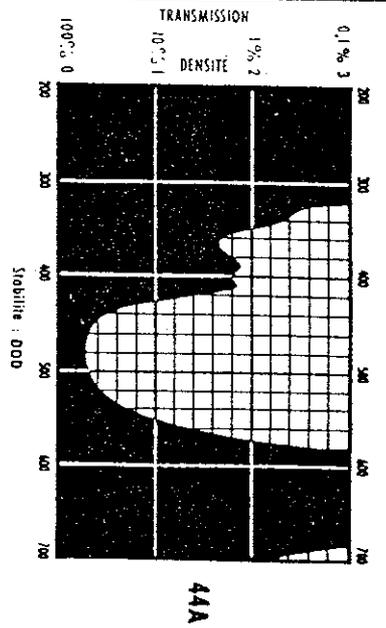
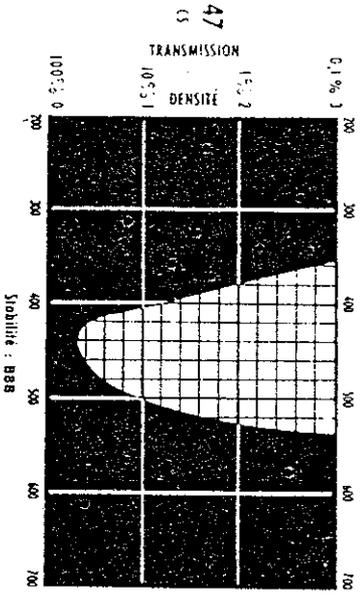
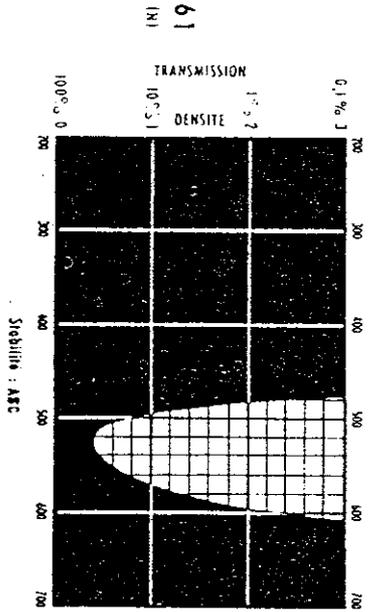
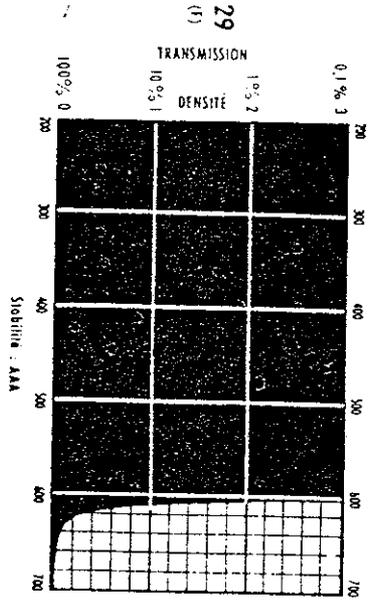
Les sources sont placées entre 10 et 20 cm de l'objet et une modification de la distance doit se traduire par une variation de luminosité.

1



LUMIERE BLANCHE





QUATRE ENCREES QUI VONT CRÉER TOUTES LES COULEURS

*La meilleure façon de comprendre
comment avec quatre encres
on peut imprimer toutes les couleurs
c'est de reprendre la boîte d'aquarelle
de notre enfance.*



E OIN des termes techniques et des définitions scientifiques ! Au risque de passer pour un vulgarisateur de bas étage, je ne vais pour vous expliquer comment on imprime en couleurs, vous

parler ni de synthèse additive ou soustractive, ni d'effet trichrome, ni des encres primaires ou de la dégradation de la lumière pure, et encore moins des triangle XYZ de la commission internationale de l'éclairage, ou des mesures en degrés Celsius de telle ou telle couleur. L'important est de comprendre comment le *Monde* va s'y prendre pour offrir à ses lecteurs des illustrations en couleurs.

Il n'a d'ailleurs pas attendu la mise en route de la nouvelle imprimerie pour faire de la couleur ; on a, par exemple, beaucoup parlé des chaussettes rouges de M. Bérégoïov ! Dans ce cas,

comme pour un titre qui serait souligné d'un trait de couleur, ou qui apparaîtrait en noir avec un rectangle jaune, ou vert, ou rouge, il s'agit de ce que l'on appelle une impression deux couleurs (ou trois s'il y en a trois, etc.). C'est-à-dire qu'il s'agit de couleurs bien franches qui sont juxtaposées. C'est donc très différent de la quadrichromie qui a pour but de restituer sur un même document toutes les nuances du spectre solaire.

Dans le cas d'impressions en deux couleurs, le procédé est extrêmement simple : sur un cylindre de la rotative sera fixée la plaque comportant tout ce qui doit être imprimé en noir, et sur un autre cylindre la plaque comportant uniquement la couleur. La bande de papier va passer d'un cylindre à l'autre pour être, grâce à un repérage contrôlé électriquement, imprimée successivement en rouge et en noir.

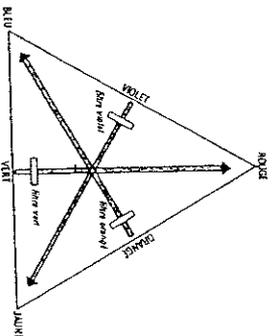
Plus complexe est la reproduction d'un document polychrome, par exemple une photographie en couleurs. Il faudra alors réaliser une quadrichromie, c'est-à-dire

imprimer successivement ce que l'on peut appeler les trois couleurs de base (bleu, rouge, jaune) et le noir.

Avant d'en arriver là, pour comprendre qu'avec seulement ces trois encres on peut faire du vert, du brun, de l'orangé, du violet, etc., prenez une feuille de papier et dessinez un triangle équilatéral. A la pointe du sommet, en haut, vous écrivez : rouge ; à celle du bas à gauche : bleu ; et à la troisième, en bas à droite : jaune. Après cela, il suffit d'avoir joué une fois dans sa vie avec une boîte de tubes de couleurs pour savoir qu'en mélangeant du bleu et du jaune on obtient du vert, du rouge et du violet, et avec du rouge et du jaune de l'orange. Et que, par exemple, dans ce dernier cas, suivant la proportion de rouge et de jaune, on pourra aller, en dégradé, d'un orangé presque rouge, un vert millon, en haut de la ligne de droite du triangle, à un jaune « bouton d'or » en bas de cette même ligne.

Donc, à l'aide de ces trois couleurs de base, on va pouvoir

reconstituer tout la palette du spectre solaire. Encore faut-il préciser qu'il ne s'agit pas de n'importe quel rouge, bleu ou jaune, mais de tons bien définis : un rouge assez violacé que l'on appelle « magenta », un bleu que l'on appelle « cyan », le jaune continuant tout bêtement à s'appeler « jaune ». Théoriquement, le mélange de ces trois encres devrait donner du noir. Pratiquement, c'est du « presque noir », une sorte de bistre très foncé, que l'on obtient ; et, pour améliorer la qualité, en particulier pour accentuer les reliefs et les ombres, on utilise, en plus des trois encres de base, une encre noire.



Au stade de la photographie, le travail va consister, pourrai-on dire, à « décomposer » notre document polychrome — diapositive ou bromure — et à le ramener à ces trois couleurs de base, plus le noir. Pour ce faire, on va, en somme, photographier successivement le document en interposant entre celui-ci et l'objectif des filtres colorés (1) : un filtre vert qui « absorbera » le cyan et le jaune (qui forment ses constituants) pour ne laisser passer (et photographier) que le magenta ; un filtre orangé (magenta et jaune) avec lequel on obtiendra le bleu ; et un filtre violet (magenta et cyan) avec lequel on obtiendra le jaune.

A la suite de cette opération de sélection, on a donc obtenu quatre négatifs (ou positifs dans certains procédés) : magenta, cyan, jaune et noir. Ces négatifs (ou positifs) sont évidemment tirés, c'est-à-dire que la photo se trouve décomposée en petits points microscopiques équidistants dont la surface varie suivant l'intensité du ton à obtenir. Par exemple, dans le ciel bleu, les points du film cyan seront plus gros, alors que sur le tablier rouge de la petite fille ce seront les points magenta, et ceux du jaune sur le sable de la plage.

En possession de ces quatre films, on va réaliser quatre plaques offset. Il ne reste plus qu'à disposer chacune de ces quatre plaques (celle du noir comportant aussi les textes, titres, filets, etc. ; de la page) sur des cylindres de la rotative : l'un sera alimenté par de l'encre magenta, les autres respectivement par les encres cyan, jaune et noir.

Lorsque la rotative sera mise en route, la bande de papier va passer d'un cylindre à l'autre pour être imprimée successivement en magenta, puis en cyan, en jaune et enfin en noir, restituant à la sortie une magnifique photo polychrome avec toutes ses nuances.

En fait, si vous regardez ce document imprimé à travers une loupe ou un compte-fils, vous ne découvrirez qu'une multitude, un semis de petits points rouges, bleus, jaunes et noirs, mais pas un seul vert, violet ou orangé. Pourtant, lorsque vous regardez la photo à l'œil nu, la prairie est belle et bien verte. Il s'agit en fait d'une illusion d'optique.

De quoi faire dire aux méchantes langues qu'une fois de plus la presse vous a menti !

LOUIS GUÉRY.

(1) Aujourd'hui, il ne s'agit plus d'une opération classique de photographie, mais de numérisation réalisée grâce à des scanners.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	1
1.1. Qu'est-ce que la couleur ?	1
1.1.1. Lumière et système visuel	1
1.1.2. Interaction lumière et matière	2
1.1.3. Synthèses additive et soustractive	3
1.2. Idée commune sur la couleur	4
1.3. Les principaux choix de la séquence d'apprentissage	5
1.3.1. Stratégie d'enseignement	5
1.3.2. Un outil de raisonnement : l'idée de chaîne	5
1.3.3. Guidage dans la construction des connaissances à partir de situations expérimentales	6
2. DESCRIPTION DE LA SÉQUENCE	7
2.1. Introduction	7
2.1.1. Présentation	7
2.1.2. Prérequis : propagation rectiligne de la lumière et vision d'objet	7
2.2. Phase 1 : poser le problème en tenant compte des conceptions des élèves	7
2.2.1. Addition de lumière rouge et de lumière verte et réponses des étudiants avant la séquence	8
2.2.2. Séance n°1 : produire et voir des couleurs	9
2.2.3. Informations complémentaires	12
1. Décrire ce que l'on voit : caractéristiques psychologiques d'une couleur	12
2. Mesurer la lumière et la couleur	12
3. La vision des couleurs	13
4. Aspect technique : production de couleurs par synthèse additive	14
2.3. Phase 2 : production de couleurs par soustraction	17
2.3.1. Séance n°2 : ombres colorées sur un écran blanc	17
1. Deux objectifs	17
2. Une activité de prévision pour introduire la soustraction de lumière	17
3. Voir les couleurs : contraste simultané	19
2.3.2. Séance n°3 : analyse spectrale des lumières blanches et colorées	20
1. Lumière blanche, bandes spectrales et couleurs spectrales	20
2. Le rôle du filtre et ses caractéristiques	20
3. Le spectre d'une lumière et la couleur perçue	21
4. La superposition de filtres identiques et la saturation de la couleur	21
2.3.3. Séance n°4 : couleur des objets opaques	22
1. Difficultés des élèves	22
2. Action sur la lumière : analogie entre pigment et filtre	23
3. Synthèse soustractive	24
4. Choix des questions pour traiter des difficultés spécifiques	25
2.4. Phase 3 : réinvestissement et activités de synthèse	27
2.4.1. Séance n°5 : couleur des objets en lumières blanche et colorée	27
1. Prévision	27
2. Un raisonnement utilisant tous les éléments de la chaîne	28
3. Vérification et observation	29
2.4.2. Retour sur quelques aspects techniques	29

BIBLIOGRAPHIE	31
ANNEXES	32
1. RAPPELS DE PHOTOMÉTRIE DES LUMIÈRES COLORÉES	32
1.1. La lumière	32
1.2. Grandeurs énergétiques et lumineuses	33
Tableau de correspondance	33
1.3 Courbes de sensibilité spectrale	35
1.4. Tableau récapitulatif des termes utilisés pour caractériser les couleurs	36
2. LEXIQUE DES TERMES D'USAGE COURANT ET TECHNIQUE	37
3. NOTES TECHNIQUES POUR LA RÉALISATION DU MATÉRIEL	39