

L'IMAGERIE SCIENTIFIQUE

Choix des palettes de couleurs pour la visualisation des champs scalaires bidimensionnels

par Marie FARGE (*)
L.M.D.-C.N.R.S., Ecole Normale Supérieure,
24, rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05

Après des rappels de théorie des couleurs, l'auteur propose une géométrisation, associée à une algèbre, de l'espace des couleurs. Marie Farge expose ensuite les règles d'harmonie des couleurs de Johannes Itten, qu'elle reformule sous forme algorithmique afin de permettre la programmation du choix automatique des palettes de couleurs. Ceci doit ainsi permettre de s'abstraire de la variabilité individuelle en matière de vision des couleurs, ainsi que du goût personnel, hautement changeant lui aussi.

La visualisation des champs à l'aide de moyens graphiques est toujours un traitement d'image, dans la mesure où l'outil graphique n'est pas neutre mais opère nécessairement un filtrage sur le champ représenté. Ainsi, par le seul choix de palettes différentes, un même champ peut-il présenter des structures apparemment dissemblables ou avoir perdu une partie essentielle de l'information qu'il contenait. C'est la raison pour laquelle il est absolument nécessaire d'indiquer la palette choisie, sinon la représentation du champ resterait ambiguë, voire ininterprétable. Une visualisation pour laquelle on ne précise pas la palette utilisée est aussi dénuée de sens qu'une mesure sans indication des barres d'erreurs.

Nous limiterons notre étude à la visualisation

de champs scalaires bidimensionnels continus (à la précision du maillage près). Nous ne discuterons pas ici du choix des modes de représentation (vue cavalière, avec ou sans lignes cachées, coupes...), problème que nous avons déjà abordé dans un autre article [1]. Nous ne considérerons que le cas des représentations de type cartographique pour lesquelles le calcul de l'image est négligeable (contrairement aux autres modes de représentation), mais qui exige au préalable la définition d'une palette de couleurs, c'est-à-dire d'une application allant de l'ensemble des valeurs numériques du champ vers l'ensemble des couleurs utilisées pour sa visualisation.

Après avoir fait quelques rappels de théorie des couleurs et précisé les termes employés, nous définissons une représentation géométrique de l'espace des couleurs, allié à une normalisation de celles-ci, que nous caractériserons ensuite par une algèbre simple afin de pouvoir décrire algorithmiquement le choix des palettes de couleurs. Nous essayerons pour finir de dégager diverses règles, basées sur les travaux de Johannes Itten [2],



qui nous guideront dans le choix des palettes de couleurs, règles que nous exprimerons également sous forme algorithmique grâce à la géométrisation que nous avons proposée de l'espace des couleurs. Le choix des palettes de couleurs devient ainsi programmable selon des principes indépendants du goût ou de l'humeur de l'utilisateur. Cette approche a pour but de réduire la part de subjectivité, tant physiologique que psychologique, qui, faute de principes directeurs, préside au choix des palettes de couleurs, entraînant de nombreuses hésitations, voire des erreurs d'interprétation, et empêchant également une bonne communication des résultats à autrui.

RAPPELS DE THEORIE DES COULEURS

Définitions

Les différents types de couleurs

Les couleurs monochromatiques à spectre discret (fig. 1) sont obtenues par décom-



Fig. 1. — Couleur à spectre discret monochromatique.

(*) Marie Farge, née le 12 mars 1953 à Paris. Master of Science, Stanford University. Doctorat de Troisième cycle en physique, Université Paris VII. Doctorat d'Etat ès mathématiques, Université Paris VI. Chargée de Recherche, CNRS. Actuellement membre du Laboratoire de Météorologie Dynamique de l'Ecole Normale Supérieure et de l'Ecole Polytechnique.

position spectrale de la lumière blanche à l'aide d'un prisme ; on les appelle plus communément couleurs de l'arc-en-ciel (bien que la correspondance entre les couleurs du spectre de la lumière blanche et celles de l'arc-en-ciel ne soit pas en toute rigueur exacte). Elles ont un spectre discret (ou spectre de raies) ne présentant qu'une fréquence excitée.

Les couleurs non monochromatiques à spectre discret (fig. 2) sont les couleurs qui ne figurent pas dans l'arc-en-ciel, telle la couleur pourpre. Elles ont également un spectre discret, mais présentent plusieurs fréquences excitées.

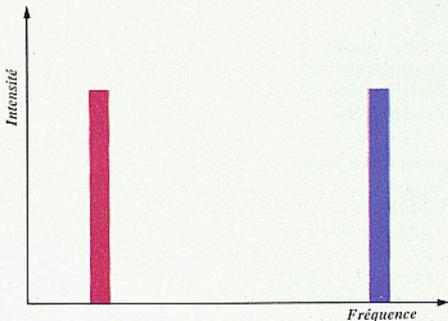


Fig. 2. — Couleur à spectre discret non monochromatique.

Les couleurs à spectre continu (fig. 3) sont moins vives que les couleurs à spectre discret et peuvent être, soit monochromatiques si le spectre ne comporte qu'un maxima ν_{\max} , soit non monochromatiques si le spectre en contient plusieurs.

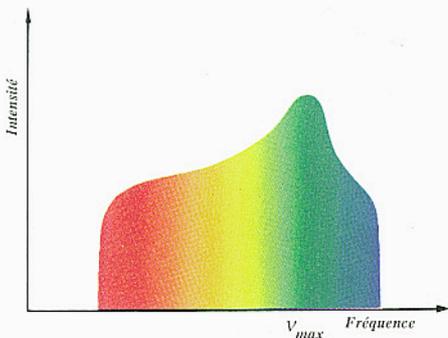


Fig. 3. — Couleur à spectre continu.

La couleur blanche (fig. 4) présente un spectre continu d'équipartition de l'énergie, c'est-à-dire tel que toutes les fréquences soient également excitées, au moins dans la partie visible du spectre. Ce spectre correspond au rayonnement d'un corps noir incandescent porté à la température T_c , dite température de couleur. La Commission Internationale de l'Eclairage a défini comme lumière blanche de référence (étalon A) celle émise par un filament de tungstène ayant une température de couleur de 2 850 °K.

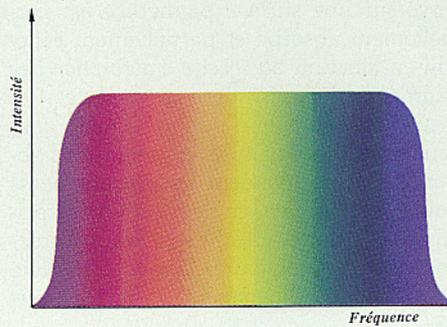


Fig. 4. — Couleur blanche.

Dimensions caractérisant la couleur

La *luminance* est l'intégrale de l'intensité lumineuse du rayonnement. Elle est proportionnelle à la quantité de photons reçus par l'œil. Nous la noterons L .

La *chrominance* correspond à la fréquence dominante ν_d . C'est elle qui détermine la couleur, et elle est en général différente de la fréquence ν_{\max} correspondant au maximum du spectre ; il peut même arriver que ν_d corresponde à une fréquence non excitée du spectre. Par exemple, la chrominance jaune peut correspondre, soit à un spectre dont le maximum coïncide avec la fréquence dominante ν_d qui est la raie jaune (fig. 5a), soit à un spectre présentant deux maxima dans le rouge et dans le vert mais non dans le jaune, qui reste cependant la fréquence dominante ν_d (fig. 5b), soit à la superposition d'un spectre de lumière blanche et d'une raie monochromatique jaune (fig. 5c).

La *saturation*, ou degré de pureté colorimétrique, correspond à la plus ou moins grande quantité de blanc ou de noir ajoutée à une couleur à spectre discret pour donner une couleur à spectre continu. Elle s'exprime par le rapport de la luminance du rayonnement monochromatique dominant $L(\nu_d)$ à la luminance totale de la source L , soit :

$$S = [L(\nu_d)]/L = [L(\nu_d)]/[L(\nu_d) + L(w)],$$

avec $L(w)$ luminance de la lumière blanche de référence.

Nous obtenons ainsi :

$S = 1$ pour un rayonnement monochromatique, la couleur correspondante est alors dite saturée,

$S = 0$ pour la couleur blanche,

$S \rightarrow 1$ pour les couleurs fortement saturées, dites *couleurs vives*,

$S \rightarrow 0$ pour les couleurs non saturées, dites *couleurs ternes*.

Postulat de trivariance visuelle

Par nature la vision est essentiellement

trichrome et non spectrale. Comme l'a suggéré Thomas Young (voir encadré), l'œil comprend trois types de photorécepteurs dont la stimulation combinée donne lieu à des millions de sensations de couleur différentes. De plus la perception d'une couleur donnée n'a pas de correspondance unique avec un stimulus coloré particulier, comme nous l'avons déjà vu avec l'exemple de la sensation de couleur jaune, qui peut correspondre à des lumières ayant des distributions spectrales différentes (fig. 5).

Ainsi, pour définir une *couleur non monochromatique*, trois dimensions sont-elles nécessaires et suffisantes : une dimension photométrique, la luminance, et deux dimensions chromatiques, la chrominance et la saturation. Pour définir une *couleur monochromatique*, deux dimensions sont nécessaires et suffisantes : la luminance et la chrominance. Pour un *niveau de gris*, allant du blanc au noir, une seule dimension est nécessaire : la luminance.

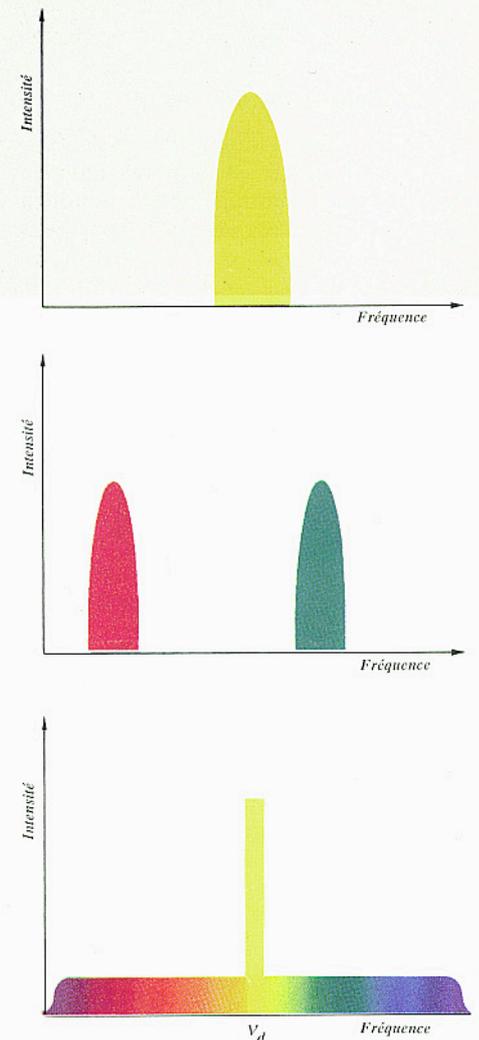


Fig. 5. — Différentes compositions spectrales donnant la couleur jaune.

Colorimétrie

Lois colorimétriques

Loi de complémentarité : deux rayonnements, $L(v_1)$ et $L(v_2)$, sont dits complémentaires si leur somme donne de la lumière blanche, soit :

$$L(v_1) + L(v_2) = L(w).$$

Equation colorimétrique de Maxwell : la somme de deux rayonnements monochromatiques, $L(v_1)$ et $L(v_2)$, est égale à la somme d'un rayonnement monochromatique équivalent $L(v_e)$ avec une lumière blanche $L(w)$, soit :

$$L(v_1 + L(v_2) = L(v_e) + L(w).$$

Loi de Grassmann : la somme d'un nombre quelconque de rayonnements monochromatiques est égale à la somme d'un rayonnement monochromatique équivalent et d'une lumière blanche (fig. 5), ce qui se démontre aisément par récurrence à partir de l'équation colorimétrique, soit :

$$L(v_n) = L(v_e) + L(w).$$

La synthèse additive des couleurs

La synthèse additive des couleurs se fait à partir de l'émission de rayonnement par une source lumineuse, tel l'écran cathodique. En conséquence du principe de trivariance visuelle, qui requiert une représentation tridimensionnelle pour décrire une couleur quelconque, on peut obtenir n'importe quelle couleur par addition de trois rayonnements monochromatiques, l'un rouge, l'autre vert et le dernier bleu, dites couleurs additives primaires. La couleur noire correspond alors à l'absence de rayonnement émis, tandis que la couleur blanche correspond à l'addition, en quantités égales, de trois rayonnements rouge, vert et bleu. La synthèse additive conduit à une représentation des couleurs à l'aide d'un repère cartésien sous la forme d'un cube des couleurs, dont l'axe ox représente la quantité de bleu, l'axe oy la quantité de vert et l'axe oz la quantité de rouge (fig. 6). On peut passer de cette représentation, dite RVB, à celle en luminance, chrominance, saturation (fig. 7), par une matrice de transformation établie par Maxwell (voir encadré). La représentation en RVB est la plus couramment utilisée pour les écrans cathodiques.

La synthèse soustractive des couleurs

La synthèse soustractive des couleurs se fait à partir de la réflexion de la lumière sur une surface éclairée, telle une feuille de papier. Un rayonnement lumineux en-

voyé sur une surface pigmentée est partiellement absorbé et partiellement réfléchi en fonction du spectre d'absorption des pigments déposés sur cette surface. On peut ainsi obtenir n'importe quelle couleur en additionnant les pigments qui absorbent respectivement les rayonnements rouge, vert et bleu, couleurs additives primaires, et donc réfléchissent les rayonnements complémentaires, à savoir le jaune, le rouge-bleu dit magenta et le bleu-vert

dit cyan, couleurs appelées soustractives primaires. La couleur noire est obtenue par addition des trois pigments rouge, bleu et jaune, tandis que la couleur blanche correspond à la feuille de papier vierge de tout pigment. Une confusion importante provient du fait que ni les couleurs additives primaires ni les couleurs soustractives primaires ne correspondent exactement à ce que nous entendons communément par bleu et vert.

HISTOIRE ABRÉGÉE DES THÉORIES DES COULEURS

Aristote (384-322)

Expose sa théorie des couleurs dans son ouvrage *La Météorologie*, à cause du rapport qui existe entre celles-ci et l'arc-en-ciel.

Otto von Guericke (1602-1686)

Remarque le phénomène d'« ombres colorées » mettant en évidence le contraste simultané.

Isaac Newton (1642-1727)

Montre qu'il peut à l'aide d'un prisme décomposer la lumière blanche en couleurs élémentaires, puis la recomposer en ajoutant celles-ci. Dans son traité « L'Optique », publié en 1704, il établit une classification des couleurs, sous la forme d'un cercle chromatique comprenant les onze couleurs obtenues par décomposition spectrale auxquelles il ajoute la couleur pourpre.

Thomas Young (1773-1829)

Propose sa théorie de la vision selon laquelle l'œil aurait trois types de récepteurs différents sensibiles respectivement au rouge, au vert et au bleu.

Philipp Otto Runge 1810

Publie un traité des couleurs où il adopte une nouvelle représentation de celles-ci, en utilisant la luminance, la chrominance et la saturation comme paramètres.

Goethe (1749-1832)

Publie son « Traité des couleurs », où il aborde ce problème à la fois sous l'angle de la physiologie, de la physique, de la chimie et pour finir de la psychologie. Il y attaque vivement la méthode de Newton, en prétendant que pour étudier les couleurs il ne suffit pas de les décomposer et de les isoler, car l'essentiel du phénomène tient au contraire aux réactions des couleurs entre elles. C'est la raison pour laquelle il accorde une importance majeure au phénomène de « contraste simultané ».

Eugène Chevreul (1789-1889)

Chimiste, directeur de la Manufacture des Gobelins, montre, dans son ouvrage « De la loi du contraste simultané des couleurs et de l'assortiment des objets colorés », l'importance du rôle de la lumière sur la perception des couleurs, qui selon la composition de son spectre modifie celle-ci. Il établit une théorie selon laquelle tout mélange pigmentaire rompt la force des couleurs, celles-ci ne devant plus être mélangées mais obtenues en superposant des taches de couleurs élémentaires. La théorie des couleurs de Chevreul sera largement utilisée par les peintres impressionnistes et servira également à fonder les techniques de quadrichromie.

Hermann Günther Grassmann (1809-1877)

Énonce la 'Loi de Grassmann' selon laquelle un

nombre quelconque de lumières pures, c'est-à-dire non saturées, est équivalent à la somme d'une lumière monochromatique et d'une lumière blanche.

James Clerk Maxwell (1831-1879)

Est le premier à avoir complètement formalisé la colorimétrie, avant Helmholtz auquel on attribue pourtant généralement ceci. Maxwell montra que toute couleur peut être obtenue par addition de trois couleurs élémentaires, le rouge, le vert, le bleu, et non sept comme le pensait Newton. Il établit, par une série de tests réalisés avec sa femme à l'aide d'instruments qu'il construisit lui-même, les formules physio-perceptives qui permettent de passer de la représentation en termes de luminance-chrominance-saturation à celle en termes de rouge-vert-bleu. Il publia plusieurs articles sur la vision des couleurs, où il expliquait entre autres le daltonisme, et, en collaboration avec Thomas Sutton, il réalisa la première photographie couleur faite à partir d'une technique de trichromie, qu'il présenta en 1861 devant la Royal Society de Londres.

Wassily Kandinsky (1866-1944)

Peintre d'origine russe, professeur au Bauhaus, école de peinture et d'arts graphiques qui exerça une influence déterminante sur l'art contemporain ; elle fut installée à Weimar en 1919, transférée ensuite à Dessau puis à Berlin, où elle sera fermée par les nazis en 1933. Kandinsky publia dès 1912 son ouvrage majeur, intitulé « Du spirituel dans l'art, et dans la peinture en particulier », où il jette les fondements de l'art abstrait et discute tout particulièrement la signification et le symbolisme des couleurs.

Johannes Itten (1888-1967)

Peintre d'origine suisse, également professeur au Bauhaus de Weimar, publie son traité intitulé « L'Art de la couleur », ouvrage considéré parmi les peintres comme la référence en ce qui concerne l'utilisation des couleurs. Itten pense que « la notion d'harmonie des couleurs doit se libérer du conditionnement subjectif - goûts, impressions - et s'ériger en une loi objective ». Son approche cependant est très différente de celle du physicien, car, d'après Itten, « pour l'artiste, c'est l'effet des couleurs qui est décisif, et non la réalité des couleurs, telles qu'elles sont étudiées par les physiciens et les chimistes ». Tout comme Goethe il n'étudie jamais une couleur isolément puisque, « de même que seul le contexte peut attribuer au mot isolé sa signification, de même le rapport qui s'établit entre différentes couleurs est le seul à donner à chacune d'elles son sens véritable et son expression particulière ».

Traditionnellement, en peinture on considère les *couleurs soustractives primaires* comme étant le *bleu*, le *rouge* et le *jaune*, et c'est la convention que nous adopterons par la suite car elle évite les confusions de terminologie. Il est également important de remarquer que le mélange des couleurs ne donne pas le même résultat suivant que l'on travaille en synthèse additive ou en synthèse soustractive : ainsi du bleu plus du jaune donne-t-il du vert en soustractif, mais du blanc en additif. Dans la pratique, si nous sommes bien accoutumés avec la manipulation des couleurs soustractives, et ce depuis l'enfance, nous n'avons pas actuellement une connaissance empirique suffisante de la synthèse additive (les choses seront probablement différentes pour les générations à venir, le jour où les enfants apprendront à manipuler les couleurs à partir d'écrans cathodiques et non plus à partir de peintures ou de crayons). Étant donné notre manque d'entraînement actuel, nous choisirons, dans la suite de ce texte, de raisonner uniquement à partir des couleurs soustractives, qui restent les seules parlantes du point de vue intuitif pour un public non averti.

Vision des couleurs

Perception des couleurs

La rétine de l'œil comprend deux types de récepteurs photosensibles : les *bâtonnets*, mesurant la luminance, et les *cônes*, mesurant la chrominance et la saturation. Pour ce faire les cônes contiennent trois types de pigments ayant chacun des pics d'absorption en fréquence différents : dans le *rouge*, dans le *vert* et dans le *bleu*. L'œil crée alors trois images noir et blanc de luminance variable dans les trois systèmes de cônes et les compare pour engendrer la sensation de couleur. Les bâtonnets sont hypersensibles et fonctionnent à des niveaux d'éclairement mille fois plus faibles que les cônes. C'est la raison pour laquelle la vision nocturne n'est pas colorée, l'œil étant alors dans des conditions de luminosité inférieure au seuil de sensibilité des cônes.

Notation des couleurs

L'œil a moins d'une octave de bande passante en fréquence, ce qui est rudimentaire en comparaison des possibilités de l'oreille, dont la bande passante est des dizaines de fois plus large. Ainsi l'oreille peut-elle effectuer la décomposition spectrale de n'importe quel son, en trouvant à la fois la fondamentale et les premières harmoniques, tandis que l'œil en est incapable, d'où la difficulté que nous avons,

faut d'analyse fréquentielle adéquate, à reproduire une couleur donnée.

En revanche, et contrairement à l'oreille, l'œil a une puissance incomparable d'analyse spatiale, ce qui lui permet de reconnaître aisément des structures au sein d'une image, même bruitée, ou de se localiser dans un environnement complexe.

C'est cette limitation des facultés de discrimination de l'œil en fréquence qui rend le problème du traitement des couleurs aussi délicat. Cela a pour conséquence le fait qu'il n'existe *aucun système universel de notation des couleurs*, comme c'est le cas en musique, ce qui rend toute approche quelque peu objective vraiment difficile. C'est la raison pour laquelle nous voulons simplifier les choses au maximum en cherchant à définir le système de représentation des couleurs le plus élémentaire, qui nous servira ensuite de repère pour la caractérisation de n'importe quelle couleur, que nous serons alors capable de localiser par rapport à nos couleurs de référence.

Problèmes ouverts

Le travail de traitement du signal opéré par le cerveau à partir des informations que lui envoie l'œil est des plus complexe et reste en grande partie encore inexplicité, car il met en jeu des processus physiques, chimiques, physiologiques et psychologiques qui interagissent les uns avec les autres. En matière de vision des couleurs il reste de très nombreux problèmes à lever, tels que :

- Pourquoi l'œil voit-il obstinément les mêmes couleurs sous des conditions d'éclairage extraordinairement imprévisibles et changeantes ?
- Comment voit-on les couleurs qui ne sont pas dans le spectre de l'arc-en-ciel, tel le pourpre ?
- Comment expliquer que la couleur, reconnue par l'œil comme dominante, ne corresponde pas exactement à la fréquence qui domine effectivement quand on mesure le spectre à l'aide d'instruments ?

Erwin Land, auteur de la *Théorie rétinex de la vision des couleurs* [3], travail récent qui tient compte de la physiologie de l'ensemble rétine-cortex et insiste sur l'aspect essentiellement perceptif de la colorimétrie, fait à ce sujet cette remarque, très importante :

« *Seuls nos yeux peuvent déterminer les véritables couleurs des objets, c'est-à-dire celles qui sont perçues : les spectro-photomètres*

ne le peuvent pas. Ce point n'est pas évident pour tout le monde. »

GEOMETRISATION ET NORMALISATION DE L'ESPACE DES COULEURS

L'approche adéquate pour aborder le problème du choix des palettes de couleurs n'est, *ni scientifique* – nous ne cherchons pas à comprendre les processus physiques et physiologiques qui gouvernent la vision des couleurs, encore largement inexpliqués aujourd'hui –, *ni artistique* – nous ne cherchons pas à exprimer les couleurs dans leur essence afin de produire chez le spectateur une résonance sensorielle et spirituelle –, *mais purement pragmatique*, car elle vise seulement à transmettre de l'information sous forme graphique, le plus intégralement et clairement possible.

Choix de la synthèse soustractive

Ce souci de pragmatisme nous conduit tout d'abord à choisir la *synthèse soustractive des couleurs*, basée sur le mélange de pigments de couleurs élémentaires : *rouge, jaune et bleu*, et non celle additive, fondée sur l'addition de rayonnements de couleurs élémentaires : rouge, vert et bleu. En effet, ce langage, qui est aussi celui des peintres, est pour nous à la fois le plus immédiat, nous étant familier depuis l'enfance, et le plus souple d'emploi, car il nous permet d'effectuer des tests de palette sur un coin de papier avec de simples crayons, évitant ainsi de recourir, dans un premier temps, à l'écran cathodique qui risquerait de nous entraîner contre notre gré dans sa propre logique des couleurs que nous maîtrisons mal. Par exemple, sur un écran cathodique le magenta et le cyan sont des couleurs obtenues respectivement par addition du rouge et du bleu et du bleu et du vert. N'étant pas habitués à la synthèse additive des couleurs, nous ressentons ces couleurs comme étranges et artificielles, disons des couleurs « de synthèse » comme on parle d'éléments chimiques de synthèse par opposition aux éléments naturels. Cette remarque ne sera probablement plus vraie pour les générations futures, accoutumées très jeunes à manipuler les couleurs au moyen d'écrans cathodiques.

Choix de la représentation luminance-chrominance-saturation

Thomas Young (voir encadré) a proposé dans sa théorie de la vision des couleurs le principe de trivariance visuelle, selon lequel la rétine de l'œil contient trois types de pigments différents, sensi-

bles respectivement au rouge, au vert et au bleu, ce qui permet de décomposer n'importe quelle couleur selon cette base. Maxwell confirma cette hypothèse et établit les formules perceptives qui permettent de passer de la représentation sous la forme d'un cube (fig. 6), de composantes

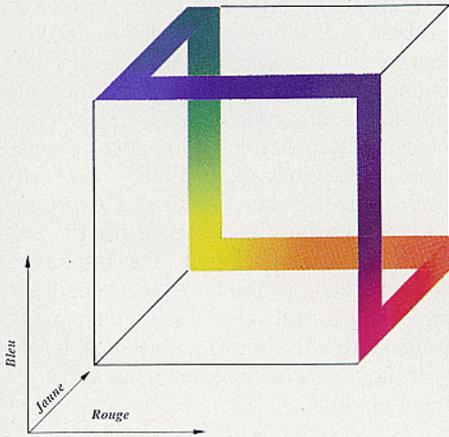


Fig. 6. - Cube des couleurs.

rouge-vert-bleu en synthèse additive, ou rouge-jaune-bleu en synthèse soustractive (qui est celle que nous avons retenue ici), à celle sous la forme d'un cône (fig. 7), dont les composantes sont la *luminance*, qui correspond à l'intensité lumineuse perçue, la *chrominance*, qui correspond à la raie spectrale dominante, et la *saturation*, qui indique si la couleur est plus ou moins vive.

Réduction de la dimensionnalité de l'espace des couleurs

Pour simplifier la représentation de l'espace des couleurs, nous avons tout

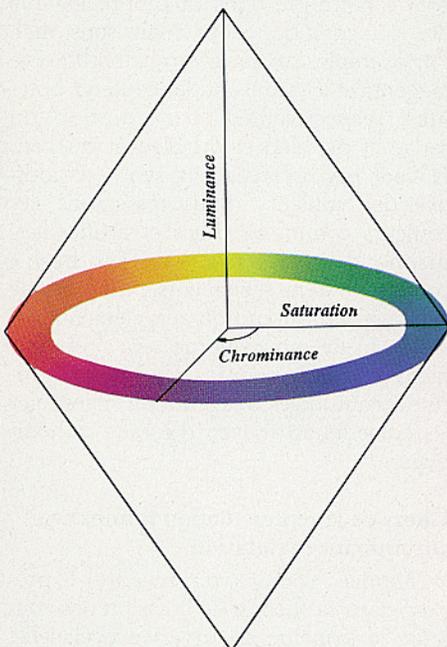


Fig. 7. - Cône luminance-chrominance-saturation.

d'abord décidé de *n'employer que des couleurs vives, c'est-à-dire de saturation maximale*. En effet, sur un écran cathodique il est souvent très difficile de distinguer une couleur désaturée, mélangée à du blanc par exemple, d'une couleur éclaircie en augmentant sa luminance. Ce choix réduit la dimensionnalité de l'espace des couleurs de trois à deux dimensions, et l'on obtient alors un *plan des couleurs* (fig. 8), où la *luminance* varie selon l'axe vertical et la *chrominance* varie selon l'axe horizontal. Il faut ici remarquer que chaque couleur saturée possède une dynamique en luminance qui lui est propre (représentée par la parabole sur la fig. 8) : le jaune vif, par exemple, est beaucoup plus lumineux que le bleu vif, et le violet se laisse facilement éclaircir sans être dénaturé, alors que le rouge tend à devenir rose dès qu'on l'éclaircit.

L'information est codée sur la luminance seule

Sachant que, d'une part la vision des couleurs peut varier considérablement d'un individu à l'autre (8 % de la population masculine et 0,5 % de la population féminine est daltonienne ou dichromate,

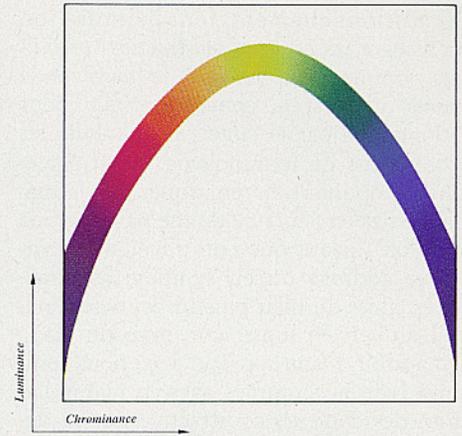


Fig. 8. - Plan luminance-chrominance.

car ayant deux types de cônes au lieu de trois), et que, d'autre part la reproduction des couleurs peut être fluctuante selon le soin apporté par le laboratoire photographique et l'imprimeur, nous adopterons le principe suivant : *toute l'information contenue dans le champ à visualiser sera codée sur la luminance seule, c'est-à-dire sur l'image en noir et blanc, et la chrominance ne sera utilisée que de façon redondante* pour renforcer certaines caractéristiques du champ (valeurs positives versus va-

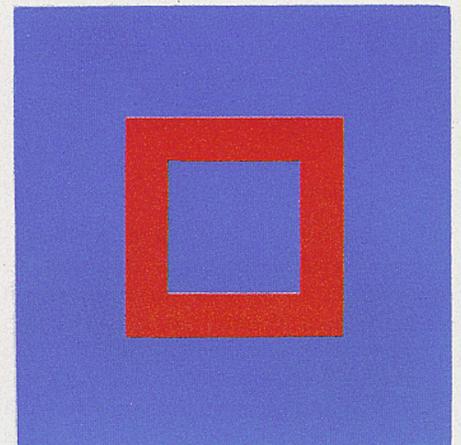
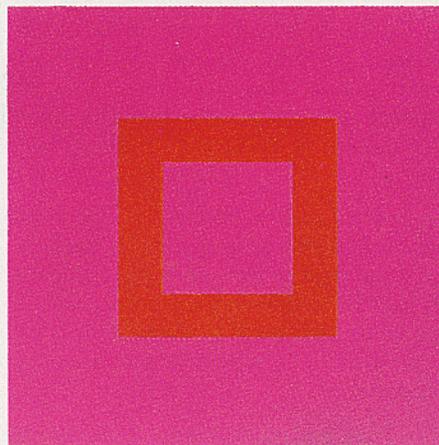
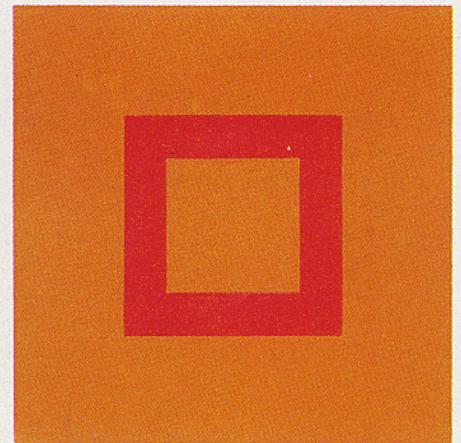
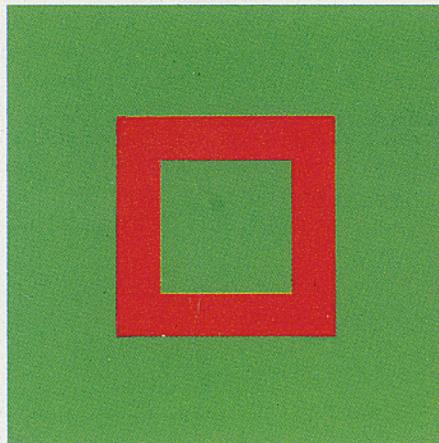


Fig. 9. - Contraste simultané.

leurs négatives par exemple) et pour distinguer rapidement, sans avoir à lire le titre, plusieurs champs de nature différente (température, tourbillon, vorticité par exemple).

Problème de la répartition des niveaux de luminance

Le choix de la répartition des niveaux de luminance (répartition discrète donnant lieu à des lignes de niveaux, répartition continue ou répartition continue à seuil) est un problème délicat que nous avons discuté dans un pr c dent article [1] et qui dépend fondamentalement des questions que l'on se pose sur ce champ : veut-on mettre en évidence les grandes échelles, les petites échelles, la régularité, les quantités intégrales, les quantités différentielles ? etc. Mais il est important de savoir que le choix des niveaux de luminance dépend fondamentalement de ce que l'on cherche et nécessite une réflexion préalable propre à chaque type de problème traité. Contrairement au choix des chrominances, que nous allons aborder maintenant, le choix des niveaux de luminance ne peut être défini *a priori* de façon simple et universelle.

Discrétisation de la chrominance

Ayant opté pour la synthèse soustractive des couleurs, nous avons alors lu différents ouvrages de référence utilisés par les peintres, à savoir les textes de Goethe [4], Itten [2] et Kandinsky [5], [6]. Finalement nous avons écarté le *Traite des couleurs* de Goethe, dont la finalité est essentiellement scientifique, exceptée la sixième section, ainsi que les écrits de Kandinsky, dont la terminologie suppose déjà une sensibilité très  veill e, car ils font appel à des nuances de perception pour trop subtiles pour un utilisateur moyen : « couleurs rugueuses, aiguës, irritantes, lisses, veloutées », « moelleuses et

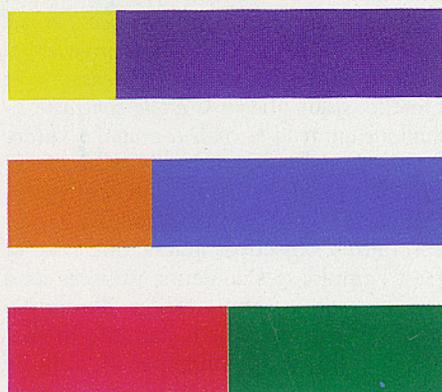


Fig. 10. — [Contraste de qualité.

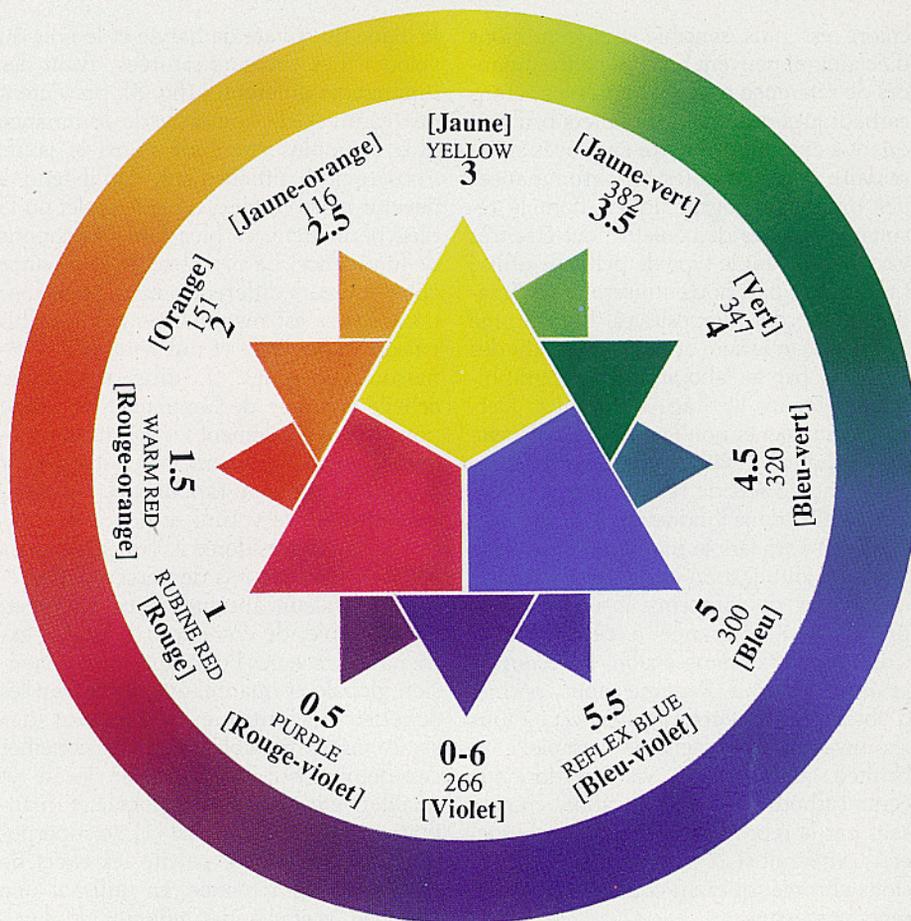


Fig. 9. — Normalisation Farge. Dans l'ordre allant de l'extérieur vers l'intérieur : [NOM], NUANCE PANTONE, Numérotation.

douces », « dures et sèches », « parfum, sonorité des couleurs »... De plus Kandinsky traite surtout du rapport, pour lui indissociable, entre forme et couleur. Or, dans le cas qui nous intéresse, nous ne contrôlons pas, au moins *a priori*, les formes issues de nos simulations numériques.

Ainsi le langage de Kandinsky, probablement bien adapté à une démarche artistique, est-il trop riche pour ce que nous voulons en faire, et risque de nous égarer par son symbolisme complexe. Son analyse ne nous semble pas assez formelle, pas assez précise, pour s'adresser à un public non artiste, qui recherche avant tout un langage, le plus élémentaire et le moins ambigu possible, pour parler des couleurs. L'analyse d'Itten, par sa simplicité, sa rigueur et sa clarté, nous apparaît en revanche bien adaptée à notre propos.

Le système d'Itten repose sur le cercle chromatique de douze couleurs, primaires et secondaires, saturées. Il justifie ce choix en disant que : « Etablir des cercles chromatiques de 24 ou 100 parties est un non-sens, en revanche, il faut voir les douze couleurs avec la même précision que le musicien entend les douze sons. » Dans le milieu scien-

tifique, notre sensibilité aux couleurs n'ayant reçu aucun entraînement spécial, nous pensons qu'il faut se limiter à une représentation la plus simple possible.

Normalisation des douze chrominances de base

Pour garantir, autant que faire se peut, l'objectivité des douze chrominances de base proposées par Itten, nous les avons définies en nous référant au nuancier Pantone* (fig. 11), catalogue de 593 couleurs étalonnées, universellement utilisées dans les domaines des arts graphiques et de l'imprimerie. Les 593 couleurs du nuancier Pantone existent sous la forme de papiers colorés mats, brillants ou transparents, ainsi que sous la forme de feutres, disponibles dans les magasins d'arts graphiques. Les feutres permettent à tout un chacun de tester ses palettes *a priori* sans recourir à la visualisation du résultat sur l'écran, tandis que les papiers mats (préférables aux papiers brillants dont l'effet

* Pantone est une marque déposée appartenant à : Pantone Inc., 55 Knickerbocker road, Moonachie, New Jersey 07074, Etats-Unis.

coloré est plus sensible aux conditions d'éclairage) peuvent servir de chrominances de référence pour étalonner les écrans cathodiques utilisés. Les papiers brillants quant à eux pourront être employés si nécessaire pour contrôler les chrominances des tirages photographiques, dont le résultat en termes de couleur peut être très variable suivant le type de pellicule utilisé (pour notre part nous utiliserons systématiquement des diapositives Ektachrome 100 ASA) et le soin apporté au rendu des couleurs par le laboratoire photographique effectuant le tirage sur papier. Dernier avantage, et non le moindre, de cette normalisation : étant donné que le nuancier Pantone sert de référence en matière de couleurs dans l'industrie de l'imprimerie, et ce à travers le monde, il sera facile lors de la publication d'un article d'exiger de la part de l'imprimeur une couleur précise par référence à ce nuancier. Comme tout système étalon, le recours à la normalisation Pantone nous permet d'obtenir la couleur souhaitée, ceci à tous les niveaux d'une chaîne complexe et bruitée, allant de la visualisation sur écran cathodique à la publication, en passant par la reproduction photographique, et d'éviter ainsi d'accumuler les distorsions chromatiques au cours de ces différents processus.

CHOIX DES PALETTES DE COULEURS

Théorie des sept contrastes de couleur d'Itten

Nous exposerons ici brièvement la théorie des sept contrastes de couleur de Johannes Itten, sur laquelle nous nous appuyerons pour définir les règles de choix des palettes de couleurs.

Le contraste de chrominance

C'est le contraste qui existe entre les trois couleurs primaires, rouge, jaune, bleu. Ce contraste diminue au fur et à mesure que les couleurs employées s'éloignent de ces trois couleurs primaires sur le cercle chromatique (fig. 11). Ce contraste donne une impression forte et sans ambiguïté, aussi l'employerons-nous à des fins de classification, car il permet de définir les codages de couleur les plus distincts possible, réduisant ainsi les risques d'erreurs dus à la variabilité de la sensibilité visuelle individuelle.

Le contraste de luminance

Le contraste de luminance, ou contraste clair-obscur, est maximal entre

le blanc du sulfate de baryte et le noir du velours. Les couleurs saturées, ayant des luminances différentes (fig. 8), présentent des gammes de contraste de luminance plus ou moins étendues. Ainsi le jaune s'obscurcit-il difficilement, car il tend à devenir marron, tandis que le violet ou le bleu permettent les plus fortes variations de luminance. Le contraste de luminance entre couleurs différentes mais de saturations égales est maximal pour la combinaison jaune-violet et nul pour la combinaison vert-rouge. L'utilisation d'une échelle continue de luminance est idéale pour suivre localement les variations relatives d'un champ, même très faibles – car l'œil est sensible au rapport des luminances entre points voisins et non à leur valeur absolue considérée isolément –, mais elle ne permettra pas de percevoir clairement les valeurs absolues de ce champ et, par exemple, de comparer différents extrêmes entre eux. Pour une compréhension globale et quantitative du champ les échelles discontinues présentant des seuils sont préférables. Afin de concilier ces deux possibilités, analyse locale et qualitative *versus* analyse globale et quantitative, nous avons choisi [1] de superposer pour une même palette les effets de contraste de luminance, en utilisant une *variation continue des niveaux de luminance*, et ceux de contraste de chrominance, en choisissant au contraire une *variation discrète des chrominances*, telle que l'on passe brusquement d'une chrominance à une autre à partir d'un certain seuil (fig. 13).

Le contraste chaud-froid

Cette terminologie se rapporte à la constatation physiologique suivante : dans une pièce bleu-vert la sensation de froid apparaît à partir de 15 °C, tandis que dans une pièce rouge-orangé, celle-ci ne se fait sentir qu'en dessous de 12 °C, car la couleur ambiante a une action sur la circulation sanguine. Le contraste chaud-froid maximal se rencontre entre le rouge de Saturne et le bleu-vert de l'oxyde de manganèse. Sur le cercle chromatique (fig. 11), les couleurs allant du jaune au violet en passant par le rouge sont chaudes, tandis que celles passant par le bleu sont froides. Cependant l'effet d'une couleur est tantôt chaud ou tantôt froid suivant qu'elle contraste avec des tons eux-mêmes plus froids ou plus chauds. Le contraste chaud-froid est de tous le plus éclatant. Nous l'employerons pour effectuer des classifications dichotomiques, par exemple pour séparer le plus distinctement possible les *valeurs positives*, caractérisées par des *couleurs chaudes*, des

valeurs négatives, caractérisées par des *couleurs froides* (fig. 13).

Le contraste des complémentaires

La couleur complémentaire d'une couleur donnée est représentée par la somme de toutes les autres couleurs composant son spectre. Le mélange de deux couleurs complémentaires, ou plus généralement de plusieurs couleurs en équilibre complémentaire, donne du gris. En revanche, la juxtaposition de couleurs complémentaires les unes à côté des autres les rend plus lumineuses. En 1797 Rumford avait déjà établi que les couleurs ne sont en harmonie que si leur mélange donne du gris, ce que le physiologue Hering justifia plus tard en montrant que « *le gris moyen crée dans l'œil un état d'équilibre parfait* ». Itten en fait « *le principe fondamental de l'harmonie des couleurs* », car « *tous les autres mélanges de couleurs qui ne donnent pas de gris sont de nature expressive et non harmonieuse* ». Nous ferons de ce principe d'harmonie, basé sur l'équilibre de complémentarité qui doit exister entre les couleurs, la première condition que doit remplir une palette pour être retenue (fig. 13).

Le contraste simultané

Pour une couleur donnée, notre œil exige la couleur complémentaire dans son champ de vision et, si celle-ci ne lui est pas donnée, il la produit lui-même. C'est la loi du contraste simultané. Goethe puis Chevreul (voir encadré), chimiste, directeur de la Manufacture des Gobelins, ont beaucoup insisté dans leurs travaux de théorie des couleurs sur l'importance du contraste simultané. Celui-ci se produit entre deux couleurs non complémentaires, et en conséquence une même couleur sera ressentie comme différente suivant la couleur qui l'environne (fig. 9). Cependant, si un contraste clair-obscur est également présent, il tend à détruire le contraste simultané. Itten faisait remarquer que, « *grâce au contraste simultané, les couleurs perdent leur caractère objectif et réel pour déployer des effets de nature irréaliste, gagnant par là une nouvelle dimension* » et Goethe disait que : « *C'est le contraste simultané qui rend la couleur propre à l'usage esthétique* ». Pour notre part, nous éviterons à tout prix l'apparition d'effets simultanés, car nous cherchons au contraire à objectiver autant que faire se peut l'emploi des couleurs, utilisées ici à des fins de communication d'information, le côté esthétique n'étant pas recherché pour lui-même, sinon par surcroît. Le contraste simultané, produisant des effets subtils, est pour nous justement à rejeter, car il dépend beaucoup trop de la sensi-

lité individuelle, et de toute façon son utilisation serait en contradiction avec le principe d'harmonie des couleurs adopté précédemment. C'est ce *rejet des effets de contraste simultané* entre deux couleurs différentes qui nous fait adopter la convention de *toujours séparer deux plages colorées par une plage de gris* (fig. 13).

Le contraste de saturation

Les couleurs les plus pures, c'est-à-dire les plus saturées, sont celles résultant de la décomposition de la lumière blanche par un prisme. Dès qu'une couleur pure est éclaircie avec du blanc, ou obscurcie avec du noir, elle est moins saturée, mais perd également de son éclat. Une couleur pure mélangée à du blanc devient plus froide, tandis que, mélangée à du noir, elle devient plus chaude. Si une couleur est mélangée à son complémentaire elle devient terne et tend vers le gris. L'effet du contraste de saturation est relatif, car une même couleur peut paraître lumineuse à côté d'une couleur terne et devenir terne près d'une couleur plus lumineuse. Nous ne ferons pas appel au contraste de saturation, car nous préférons *n'utiliser que des couleurs saturées* afin de leur garder une vivacité maximale. Il en résulte des palettes aux couleurs vives et franches (fig. 13), donnant une impression de rayonnement, et évitant ainsi celle de tristesse provenant de couleurs trop ternes, ou de pâleur maladroite due à des couleurs trop éclaircies.

Le contraste de quantité

Le contraste de quantité de deux ou plusieurs couleurs entre elles caractérise le rapport qui existe entre les étendues respectives de chacune d'elles. La force expressive d'une couleur est déterminée à la fois par sa luminance et par la superficie relative qu'elle occupe. Nous avons vu précédemment que, pour qu'une combinaison de couleurs soit harmonieuse, il faut que son expressivité soit minimale, aussi faut-il réduire le contraste de quantité en veillant à ce que la somme de la luminance et de la surface couverte par chacune des couleurs employées s'équilibre. En se basant sur l'échelle de luminance établie par Goethe pour les couleurs primaires et secondaires, à savoir : jaune 9, orange 8, rouge 6, vert 6, bleu 4 et violet 3, on obtient les dimensions relatives (en douzièmes) que doivent avoir les surfaces correspondantes pour être en harmonie quantitative, à savoir : jaune 3, orange 4, rouge 6, vert 6, bleu 8 et violet 9 (fig. 10). Si dans une image les rapports quantitatifs sont très sensiblement

différents de ces rapports harmonieux, il se produit alors un effet de contraste simultané qui provoque l'apparition du complémentaire de la couleur qui domine. Pour éviter ceci, lors du test d'une palette sur un champ donné nous veillerons toujours, autant que faire se peut, à *minimiser le contraste de quantité* en ajustant les luminances de manière adéquate, c'est-à-dire telles que *la somme des luminances et des surfaces relatives soit sensiblement la même pour chacune des couleurs, ceci en jouant sur la position des seuils où la luminance varie brusquement*.

Dénomination et algébrisation du continuum des chrominances

Comme nous venons de le voir, nous avons décidé de n'utiliser que des couleurs saturées et de coder toute l'information en luminance, la chrominance servant alors à distinguer différents champs entre eux. Nous allons donc maintenant aborder le problème du choix des chrominances.

Afin de faciliter la mémorisation et la manipulation des chrominances, nous leur avons attribué à chacune un nom (fig. 11). Dans le but de décrire algorithmiquement les règles de choix des couleurs que nous venons d'adopter, nous avons également associé à l'échelle continue des chrominances c une échelle continue et circulaire modulo 6 de valeurs numériques v , orientée suivant l'ordre naturel du spectre visible, c'est-à-dire allant du rouge, ayant la valeur $v = 1$, au violet, ayant la valeur $v = 6$ (modulo 6) $= 0$ (fig. 11).

On obtient ainsi l'organisation suivantes des chrominances :

– Les *chrominances soustractives primaires* (ordre 1) sont le [rouge], le [jaune], le [bleu], et correspondent aux valeurs entières impaires, respectivement $v_1 = 1, 3$ et 5.

– Les *chrominances soustractives secondaires* (ordre 2) sont l'[orange], le [vert], le [violet], et correspondent aux valeurs entières paires, respectivement $v_2 = 2, 4$ et 6 (modulo 6), soit 0.

– Les *chrominances soustractives tertiaires* (ordre 3) sont nommées sous forme d'une combinaison $[c_1-c_2]$ donnant d'abord la couleur primaire c_1 puis la valeur secondaire c_2 adjacente. La valeur numérique v_3 , correspondant à la chrominance tertiaire c_3 , se calcule selon $v_3 = (v_1 + v_2)/2$. On a ainsi comme couleurs soustractives tertiaires : le [rouge-violet], le [rouge-orange], le [jaune-orange], le [jaune-vert], le

[bleu-vert] et le [bleu-violet], qui correspondent respectivement aux valeurs réelles : $v_3 = 0,5, 1,5, 2,5, 3,5, 4,5$ et 5,5.

– Les *chrominances soustractives d'ordre n* sont décrites par récurrence selon la même dénomination donnée par le couple des chrominances adjacentes, la première citée étant toujours celle d'ordre le plus bas, soit $c_n = [c_{n-2} - c_{n-1}]$, et selon la numérotation $v_n = (v_{n-2} + v_{n-1})/2$. Ainsi, à titre d'exemple, la chrominance d'ordre 5, $c_5 = [[rouge-violet] - [violet-rouge-violet]]$ aura-t-elle la valeur 0.375.

On remarque que les chrominances chaudes correspondent aux valeurs telles que $v \leq 3$ et que les chrominances froides sont telles que $v > 3$.

Choix automatique des chrominances

Le problème de base que nous rencontrons pour visualiser différents champs s'exprime de la façon suivante : comment choisir les palettes de couleurs pour visualiser J champs différents caractérisés chacun par un ensemble de I chrominances en équilibre harmonieux les unes par rapport aux autres ? Chaque palette doit ainsi identifier un champ par la combinaison de I chrominances qui lui est propre ; celle-ci doit se distinguer le plus possible des $(J-1)$ autres combinaisons de I chrominances utilisées pour identifier les $(J-1)$ autres champs. Nous avons vu précédemment que, selon Itten, pour que I chrominances soient en équilibre harmonieux il faut qu'elles soient telles que leur mélange donnerait du gris. Grâce à la géométrisation de l'espace des chrominances que nous avons définie à partir de la complémentarité des chrominances diamétralement opposées, la règle d'Itten peut également s'exprimer ainsi : I chrominances sont en équilibre harmonieux si elles correspondent aux I sommets d'un polygone inscrit dans le cercle des chrominances (fig. 12). Grâce à l'algèbre simple que nous avons associée au cercle des chrominances (fig. 11), cette règle peut s'écrire sous une forme algorithmique. Ainsi, la valeur de la i ème chrominance de la j ème palette de I chrominances en équilibre complémentaire avec $(I-1)$ autres chrominances est-elle donnée par la formule :

$$v(i,j) = [v(1,1) + (6(i-1)/I) + (6(j-1)/I)] \text{ mod } 6$$

avec i variant de 1 à I , nombre total de chrominances par palettes et j variant de 1 à J , nombre total de palettes différentes, $v(1,1)$, valeur de la chrominance de départ donnée initialement.

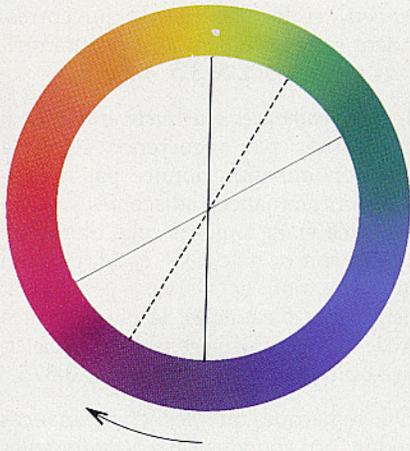
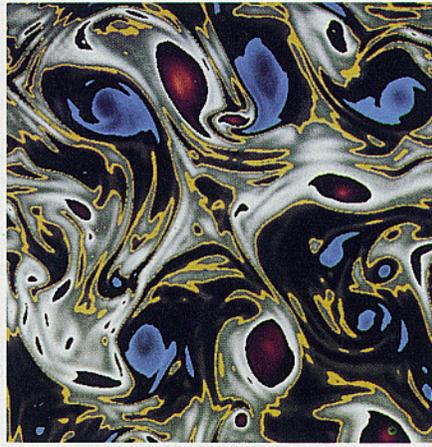
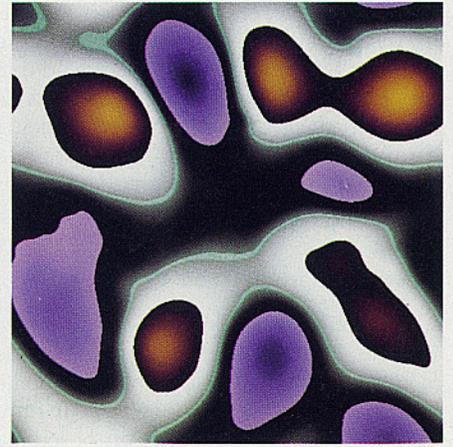


Fig. 12 a). – Choix de palettes de deux couleurs en équilibre harmonieux.



a)



d)

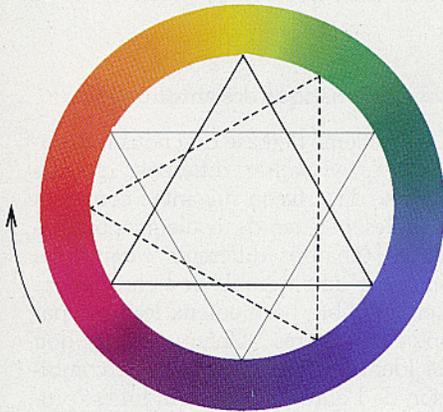
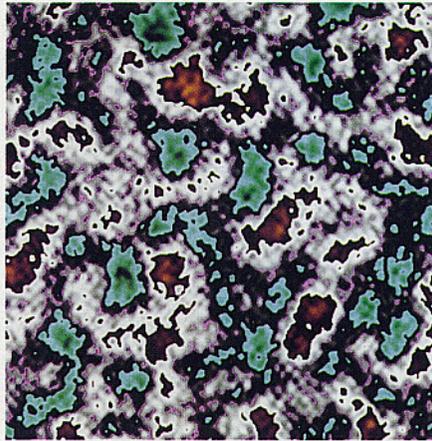


Fig. 12 b). – Choix de palettes de trois couleurs en équilibre harmonieux.



b)



e)

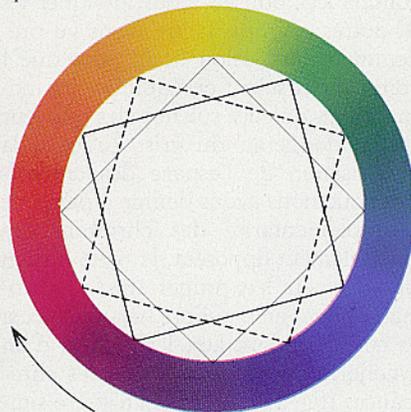
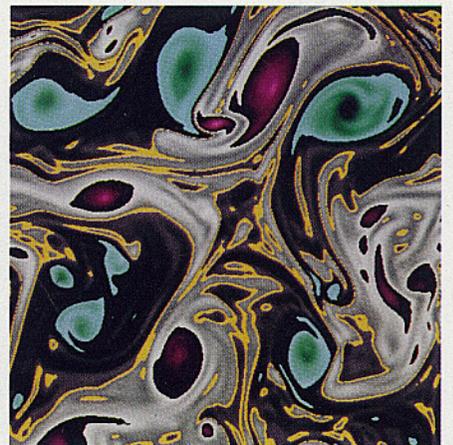


Fig. 12 c). – Choix de palettes de quatre couleurs en équilibre harmonieux.



c)



f)

Ainsi, à titre d'exemple, le choix de quatre palettes différentes de trois couleurs en équilibre harmonieux entre elles (fig. 12b), en partant de $v(1,1) = 1$ soit $c(1,1) = [\text{rouge}]$, est donnée par la matrice :

$$v(i,j) = \begin{bmatrix} 1 & 1.5 & 2 & 2.5 \\ 3 & 3.5 & 4 & 4.5 \\ 5 & 5.5 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

pour $i \in [1,3]$ et $j \in [1,4]$

qui correspond à la matrice de chrominances :

Fig. 13. – Les palettes harmonieuses au sens d'Itten correspondent aux couleurs se trouvant aux sommets de polygones inscrits dans le cercle des douze chrominances de base. Ainsi les associations de trois chrominances harmonieuses entre elles sont-elles situées aux sommets de triangles équilatéraux, telles les combinaisons : bleu-jaune-rouge (a), violet-vert-orange (b), bleu rouge jaune (c), vert violet orange (d), rouge violet-jaune vert-rouge orange (e), rouge violet-jaune orange-bleu vert (f). Une fois que chaque champ différent est caractérisé par une palette qui lui est propre, son identification est immédiate, facilitant ainsi le dépouillement et la comparaison des résultats. Les six champs présentés ici correspondent au même état instantané d'un écoulement turbulent bidimensionnel compressible.

$$c(i,j) = \begin{bmatrix} [\text{rouge}] & [\text{rouge-orange}] & [\text{orange}] & [\text{jaune-orange}] \\ [\text{jaune}] & [\text{jaune-vert}] & [\text{vert}] & [\text{bleu-vert}] \\ [\text{bleu}] & [\text{bleu-violet}] & [\text{violet}] & [\text{rouge-violet}] \end{bmatrix}$$

pour $i \in [1,3]$ et $j \in [1,4]$.

En conclusion, on peut grâce à cet algorithme programmer le choix automatique de J palettes différentes, composées chacune de I chrominances en équilibre complémentaire les uns par rapport aux autres. Le goût de l'utilisateur n'intervient nulle part ici, sinon dans le choix des nombres I et J, ainsi que dans celui de la chrominance de départ c(1,1), qui peut être au besoin tirée au hasard.

Exemple illustrant notre propos

Pour finir, nous illustrerons notre propos en appliquant notre méthode de choix automatique des couleurs à la visualisation de six champs scalaires bidimensionnels, dont l'étude permet de mieux comprendre la dynamique des écoulements turbulents bidimensionnels compressibles [7]. Ce sont : la vorticité relative ou rotationnelle de la vitesse (fig. 13a), la divergence de la vitesse (fig. 13b), la fonction de courant, c'est-à dire le Laplacien inverse de la vorticité (fig. 13d), le potentiel vitesse, c'est-à dire le Laplacien inverse de la divergence (fig. 13e), la pression (fig. 13c) et la vorticité potentielle, qui est le rapport entre la vorticité absolue et la pression (fig. 13f). Afin de permettre une identification immédiate, chaque champ est représenté avec une palette de trois chrominances qui lui est propre : une chrominance froide, dont la luminance varie continûment, fait ressortir les valeurs très négatives, une chrominance chaude, dont la luminance varie également continûment, fait ressortir les valeurs très positives, tandis que le niveau zéro est mis en évidence par une troisième chrominance, de luminance maximale, en équilibre complémentaire avec les deux autres. Nous avons ainsi adopté le codage suivant pour caractériser chacun des six champs visualisés :

Chaque plage de chrominance est séparée des autres par un fond gris, dont la luminance varie continûment, ceci afin de réduire les effets de contraste simultané. On voit que les six palettes ainsi définies (fig. 13) respectent bien le principe d'harmonie des couleurs d'Itten, car chaque groupe de trois chrominances forme un triangle équilatéral inscrit dans le cercle des chrominances (fig. 12b), ce qui garantit que leur somme donne bien du gris.

CONCLUSION

Nous espérons avoir montré que le choix des palettes de couleurs, derrière son aspect à première vue prosaïque de coloriage, cache des problèmes délicats, qui touchent à la fois à la colorimétrie, à la physiologie de la vision et aux arts graphiques. En effet, il s'agit de concilier plusieurs contraintes, souvent incompatibles :

- objectivité de la visualisation, qui doit être perçue de la même façon par différents observateurs,
- clarté de la représentation, qui doit pouvoir être décodée sans ambiguïté,
- mise en garde contre les artefacts visuels et harmonisation des couleurs entre elles.

Face au développement de moyens graphiques de plus en plus sophistiqués, une réflexion préalable nous semble essentielle, sinon on court le risque de se laisser entraîner par un outil que l'on ne domine pas et abuser par un  sthetisme séduisant mais dénué de contenu informatif si le choix des palettes est laissé au hasard d'impressions subjectives et changeantes. Ce risque, réel, ne doit pas pour autant remettre en cause l'utilisation de ces nouveaux moyens graphiques de type

« raster » qui sont aujourd'hui indispensables pour le dépouillement et la communication des résultats, soit de simulations numériques, soit d'expériences de laboratoire, soit d'observations, et apportent des possibilités d'investigation encore insoupçonnées dans le domaine de l'analyse morphologique des champs.

Nous pensons toutefois que ces moyens de visualisation dont nous disposons aujourd'hui ne joueront pleinement leur rôle que le jour où une normalisation, définissant le choix des palettes de couleurs, aura été adoptée, au moins à l'intérieur d'une même discipline. Les règles que nous venons de définir pourraient servir de point de départ pour des discussions devant conduire au choix de telles normes. En effet, si tout un chacun lit aujourd'hui facilement une carte routière, c'est uniquement par accoutumance à un certain codage. Imaginez la difficulté qu'il y aurait à employer des cartes si la signification des couleurs changeait d'une carte à l'autre. Imaginez maintenant le non-sens qui consisterait à proposer des cartes où l'on ne préciserait même pas le codage des couleurs employé. C'est malheureusement où nous en sommes aujourd'hui dans bien des cas en ce qui concerne la visualisation des champs, obtenus, soit par simulation numérique, soit après numérisation de résultats expérimentaux ou observationnels. □

REMERCIEMENTS

Les exemples d'écoulements turbulents illustrant cet article ont été calculés par Marie Farge sur le Cray-2 du Centre de Calcul Vectoriel pour la Recherche, Palaiseau, et les visualisations ont été effectuées au GVS-Lactamme de l'Ecole Polytechnique, en collaboration avec Jean-François Colonna. Les graphiques ont été réalisés par Jean-Michel Coulombier. Je voudrais également vivement remercier Alain Bossavit, Jean-François Colonna et Denise Roques, qui m'ont aid e à préciser les idées exposées ici.

RÉFÉRENCES

- [1] Marie FARGE : Normalization of high-resolution raster display applied to turbulent fields, « Advances in Turbulence », Springer-Verlag (1987).
- [2] Johannes ITTEN : Art de la couleur, Dessain et Tolra (1984).
- [3] Erwin LAND : La théorie r tinex de la vision des couleurs, Pour la science (1976).
- [4] GOETHE : Traité des couleurs, Triades (1973).
- [5] Wassily KANDINSKY : Du spirituel dans l'art et dans la peinture en particulier, Collection Médiations, Denoël (1969).
- [6] Wassily KANDINSKY : Cours du Bauhaus, Collection Médiations, Denoël (1975).
- [7] Marie FARGE et Robert SADOURNY : Wave-vortex dynamics in rotating shallow water, Journal of Fluid Mechanics, vol. 206, pp. 433-462 (1989).

I chrominances J champs	Valeurs très < 0	Valeur zéro	Valeur très > 0
Vorticité (fig. 13a)	[bleu] 5	[jaune] 3	[rouge] 1
Divergence (fig. 13b)	[vert] 4	[violet] 0	[orange] 2
Fonction de courant (fig. 13d)	[violet] 0	[vert] 4	[orange] 2
Potentiel vitesse (fig. 13e)	[bleu-violet] 5.5	[jaune-vert] 3.5	[rouge-orange] 1.5
Pression (fig. 13c)	[bleu] 5	[rouge] 1	[jaune] 3
Vorticité potentielle (fig. 13f)	[bleu-vert] 4.5	[jaune-orange] 2.5	[rouge-violet] 0.5