

La perception des couleurs interdites

Vincent Billock, Brian Tsou

12-15 minutes

Avez-vous déjà vu du jaune bleuâtre? Non, nous ne pensons ni à un vert bleuté ni à un vert-jaune, mais bien à une teinte qui serait jaune et bleu à la fois. Et un vert rougeâtre? Là encore, il ne s'agit ni d'un brun boueux qui pourrait être obtenu en mélangeant différentes couleurs, ni d'un jaune issu d'un rouge mélangé à du vert clair, ni d'une texture pointilliste où points rouges et points verts seraient mêlés, mais bien d'une seule couleur, rougeâtre et verdâtre en même temps, au même endroit. En réalité, il est peu probable que vous y soyez parvenus : aucun vert (ni aucune autre teinte) ne paraît à la fois bleuâtre et jaunâtre ; de même, il n'existe pas de rouge verdâtre.

Pourtant, nous avons trouvé comment, dans des conditions particulières, percevoir ces couleurs interdites. Ce phénomène visuel précise la notion d'opposition des couleurs proposée en 1872, par le physiologiste prussien Ewald Hering. Ce dernier suggéra que la vision des couleurs reposait sur une opposition entre le rouge et le vert, le jaune et le bleu, quatre couleurs fondamentales (auxquelles il ajoutait le blanc et le noir). Autrement dit, en chaque point du champ visuel, le rouge et le vert, d'une part, le jaune et le bleu, d'autre part, s'opposent : la perception de la couleur rouge en un point empêche la perception de la couleur verte à cet endroit, et *vice versa*. De même pour le jaune et le bleu.

L'opposition des couleurs

Ce principe d'opposition est également à l'œuvre quand on fléchit l'avant-bras : le triceps se relâche et le biceps se contracte ; muscles antagonistes, le biceps et le triceps agissent en opposition. On ne peut contracter en même temps ces deux muscles. La vision des couleurs repose sur ce même phénomène d'opposition. Ainsi, selon la théorie de Hering, les nuances de la vision sont produites par la combinaison du rouge et du jaune, du rouge et du bleu, du vert et du jaune, ou du vert et du bleu. Effectivement, nous percevons le vert bleu (le turquoise ou cyan), le rouge jaune (l'orange), le rouge bleu (le violet) et le vert jaune, mais pas ni du rouge verdâtre, ni du vert rougeâtre, ni du bleu jaunâtre, ni du jaune bleuâtre.

Cette théorie de l'opposition des couleurs a été critiquée, mais reste intéressante. Diverses recherches semblent montrer que l'opposition des couleurs naît dès la rétine et le mésencéphale, la première région cérébrale impliquée dans la vision. Les signaux bruts

correspondant aux couleurs sont produits par les cônes, un type de photorécepteurs situés dans la rétine. Il existe trois types de cônes, chacun étant pourvu d'un pigment sensible à une bande de longueurs d'onde différente, de sorte que les cônes détectent la lumière selon trois bandes de longueurs d'onde qui se chevauchent et sont centrées sur le bleu, le vert et le rouge.

D'autres cellules rétiniennes traitent les signaux émis par ces trois types de cônes, ce qui produit les signaux correspondant aux quatre couleurs primaires de Hering– le rouge, le vert, le jaune et le bleu. Mais tout se passe comme si le système nerveux était constitué de seulement deux types de canaux de perception des couleurs : un canal « rouge moins vert » où les signaux positifs représentent différents niveaux de rouge, les signaux négatifs représentent différents niveaux de vert et les signaux nuls ni l'un ni l'autre ; et un canal « jaune moins bleu » fonctionnant sur le même principe. Cette organisation est conforme à l'opposition des couleurs de Hering.

Des couleurs en fusion

En 1983, Hewitt Crane et Thomas Piantanida, de la Société *sri International*, un institut de recherche situé à Menlo Park, en Californie, ont déjoué les règles de la perception qui interdisent du rouge vert ou du jaune bleu. Ils ont demandé à des sujets de regarder une bande rouge et une bande verte accolées, ou une bande jaune et une bande bleue accolées. Un dispositif suivait la direction des yeux des sujets, et déplaçait des miroirs de sorte que les champs de couleur restaient immobiles sur la rétine des sujets malgré les saccades incessantes de leurs yeux. Ainsi, l'image était stabilisée. Les sujets ont rapporté voir les couleurs se fragmenter en morceaux qui apparaissaient, disparaissaient, puis réapparaissaient. Ils ont surtout constaté que la frontière entre les bandes colorées disparaissait au bout de quelques instants, et que les couleurs se mélangeaient au niveau de la frontière dissoute. Certains voyaient du vert rougeâtre ou le bleu jaunâtre interdits. D'autres voyaient un scintillement bleu sur un fond jaune.

Ces résultats étonnants furent négligés pour plusieurs raisons. D'abord, ils étaient quelque peu incohérents : certains sujets percevaient une illusion visuelle et non les couleurs interdites. De surcroît, ces couleurs étaient difficiles à décrire. H. Crane et T. Piantanida essayèrent de résoudre ce problème en demandant à des artistes de raconter comment ils les percevaient : sans succès. Ensuite, il était difficile de reproduire l'expérience, car le dispositif suivant les mouvements des yeux était onéreux et peu pratique à utiliser. Enfin, les chercheurs n'avaient pas de théorie à proposer pour interpréter leurs résultats. Ce fut vraisemblablement le principal écueil.

Les deux chercheurs devinèrent que leur procédure avait court-circuité la partie du système visuel responsable de l'opposition des couleurs et activé un mécanisme de « remplissage » perceptif : lorsque l'on oblige deux bandes de couleurs opposées à coexister sur la rétine, le système visuel remplit la zone frontière de ces couleurs interdites.

En 2001, nous avons proposé une nouvelle explication de ces observations. Nous savions qu'en plus de la stabilisation des images, une autre condition expérimentale fait disparaître la frontière entre des plages adjacentes de couleurs opposées : lorsque les deux plages ont la même luminance. Cette caractéristique mesure l'intensité lumineuse par unité de surface. Elle peut se définir de manière approchée comme la brillance perçue. Pour un observateur, deux couleurs ont la même luminance (ou équiluminance), si le fait de les présenter rapidement en alternance ne produit quasiment pas de sensation de clignotement entre les deux teintes.

Suivre le regard

Par ailleurs, quand des sujets observent fixement deux champs adjacents dont les couleurs ont la même luminance, ils voient la frontière entre les deux couleurs s'affaiblir, puis disparaître. Les couleurs se fondent l'une dans l'autre, sauf dans le cas des paires rouge-vert et jaune-bleu. Cet effacement est particulièrement net lorsque les mouvements des yeux de l'observateur sont réduits au maximum.

Puisque l'égalité des luminances et la stabilisation des mouvements des yeux provoquent l'une et l'autre la fusion des couleurs, nous nous sommes demandé si ces deux propriétés pourraient se combiner. L'effacement de la frontière entre couleurs serait-il alors suffisamment puissant pour se produire même avec des couleurs opposées ? Pour tester cette hypothèse, nous nous sommes associés à Gerard Gleason, du Laboratoire américain de recherche de l'armée de l'air qui étudie les saccades oculaires.

Nous avons utilisé un dispositif de suivi du regard mis au point par G. Gleason ainsi que des systèmes qui maintiennent la tête. Sept spécialistes de la vision des couleurs, capables de décrire précisément leurs perceptions, ont participé à nos expériences.

Comme la perception de la luminance de différentes couleurs varie d'un individu à l'autre, nous avons tout d'abord mesuré leurs réponses au rouge, vert, jaune et au bleu. Puis nous avons présenté à chacun d'eux des bandes adjacentes de rouge et de vert, ou de jaune et de bleu, ajustées pour que les deux couleurs apparaissent de même luminance, ou, au contraire, de luminances très différentes.

Franchir la frontière interdite

Comme nous l'avions escompté, la combinaison de l'équiluminance et de la stabilisation de l'image grâce au suivi du regard s'est révélée remarquablement efficace pour faire franchir la frontière « interdite ». Pour les images de même luminance, six de nos sept observateurs ont perçu des couleurs interdites : la frontière entre les deux couleurs disparaissait et les couleurs se mélangeaient (le septième observateur percevait du gris). Parfois, le résultat ressemblait à un gradient de couleurs allant, par exemple, du rouge au vert, avec toutes les nuances possibles de rouge verdâtre et de vert rougeâtre entre les deux. Parfois, les champs rouge et vert coïncidaient, mais à des profondeurs différentes, comme si une couleur

transparaissait à travers l'autre, mais sans être atténuée. Souvent, un agréable vert rougeâtre ou jaune bleuâtre remplissait le champ visuel. Deux sujets racontèrent qu'ils étaient désormais capables d'imaginer du vert rougeâtre et du jaune bleuâtre, mais cette faculté ne persista pas.

Nous sommes donc aujourd'hui capables de répondre à la question que le philosophe David Hume a posée en 1739 : est-il possible de percevoir de nouvelles couleurs ? Oui, mais celles que nous avons mises en évidence sont composées de couleurs familières.

À la suite de ces observations, nous avons proposé un modèle de la formation des couleurs interdites dans le cerveau. Nous pensons que certaines populations de neurones sont en compétition pour émettre les signaux nerveux : elles ne peuvent pas émettre en même temps. Tout comme deux espèces animales se disputent parfois une même niche écologique, les neurones se disputent le « droit d'émettre ». Toutefois, les neurones qui « perdent », c'est-à-dire qui n'émettent pas de signal, sont réduits au silence, mais ne meurent pas, contrairement à une espèce animale qui disparaît si une autre s'approprie les ressources.

Une simulation numérique de cette compétition neuronale reproduit l'opposition classique des couleurs: pour chaque longueur d'onde activant le système visuel, les neurones stimulés par le rouge, ou ceux activés par le vert, peuvent gagner, c'est-à-dire produire un influx nerveux, mais pas les deux populations simultanément ; de même pour les neurones « jaunes » et « bleus ». Mais si l'on empêche la compétition, par exemple en inhibant les connexions entre les populations neuronales « vertes » et « rouges », ou « bleues » et « jaunes », les teintes précédemment en conflit peuvent coexister, et les couleurs impossibles apparaissent.

Dans notre expérience, lorsque les luminances des champs rouge-vert ou jaune-bleu différaient suffisamment, les sujets ne percevaient pas les couleurs interdites. En revanche, des textures apparaissaient : par exemple, un scintillement vert sur un fond rouge, ou des rayures bleues sur un fond jaune, tout comme H. Crane et T. Piantanida l'avaient rapporté. Ils avaient sans doute utilisé des images ayant la même luminance pour certains de leurs sujets et ayant des luminances différentes pour d'autres.

Ces figures tachetées ou rayées sont étonnantes. Elles ont été étudiées dans d'autres contextes scientifiques. Elles se forment par exemple dans des mélanges chimiques où les molécules diffusent de façon asymétrique ou à des vitesses différentes. Le mathématicien britannique Alan Turing, pionnier de l'informatique, a modélisé les motifs nés de ces répartitions aléatoires de molécules. Il a ainsi reproduit les rayures du zèbre ou les taches du léopard, et d'autres phénomènes biologiques, notamment certaines hallucinations visuelles.

De multiples facteurs peuvent déclencher des hallucinations visuelles aux motifs géométriques: drogues, migraines, crises d'épilepsie et – notre préféré – un stimulus visuel nommé champ vide clignotant. Dans les années 1830, le physicien anglais David Brewster, l'inventeur du kaléidoscope, a montré que des lumières clignotantes peuvent aussi

déclencher des hallucinations visuelles. Il semble qu'en passant vite devant une clôture éclairée par le soleil tout en fermant les yeux, il ait De multiples facteurs peuvent déclencher des hallucinations visuelles aux motifs géométriques: drogues, migraines, crises d'épilepsie et – notre préféré – un stimulus visuel nommé champ vide clignotant. Dans les années 1830, le physicien anglais David Brewster, l'inventeur du kaléidoscope, a montré que des lumières clignotantes peuvent aussi déclencher des hallucinations visuelles. Il semble qu'en passant vite devant une clôture éclairée par le soleil tout en fermant les yeux, il ait lui-même expérimenté ces illusions et ressenti des flashes d'ombre et de lumière projetés sur ses paupières fermées. On peut percevoir de tels clignotements si l'on est passager dans une voiture roulant le long de rangées d'arbres éclairées par le soleil, et que l'on ferme les yeux ou, mieux encore, si l'on fixe un ordinateur dont l'écran clignote. On peut alors tenter de percevoir les illusions géométriques que cela engendre.