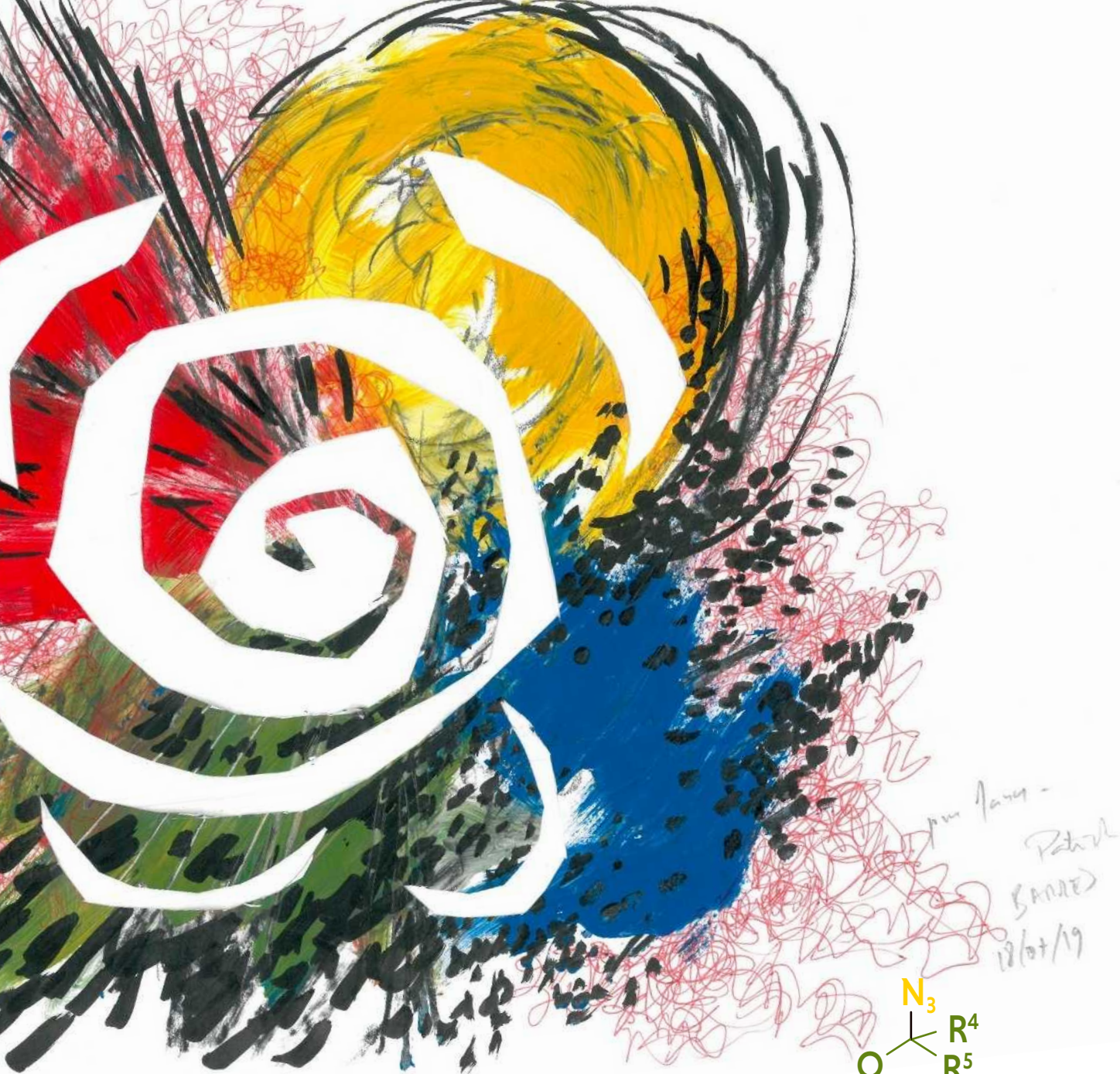


les deux paires interagissent enfin pour former le composé recherché (*voir la formule ci-dessus*). Tous les réactifs sont réunis en une seule fois, la réaction étant dépendante d'une part de la quantité de chacun et, d'autre part, de leur réactivité.

Pour optimiser le résultat, on utilise une lumière adaptée au photocatalyseur, en l'occurrence du bleu pour le ruthénium (Ru). Les conditions requises sont plutôt douces, sans chauffage, et les produits utilisés sont peu toxiques (on utilisait auparavant des réactifs à base d'antimoine, beaucoup plus nocif). Au final, la production de déchets est limitée

au maximum et le coût énergétique notablement réduit.

Revenons à l'œuvre. L'artiste précise: «L'ensemble s'articule autour d'un nœud, défini comme le sujet de la peinture et comme une métaphore de la fusion des éléments sous l'effet de la réaction photocatalysée.» Divers systèmes graphiques, comme les hachures, les taches éparpillées, l'enchevêtrement de lignes fines... ajoutent un effet vibratoire empêchant l'œil d'accommoder et que d'aucuns, chimistes en premier lieu, pourraient rapprocher des vibrations qui agitent toute molécule, notamment lors d'une réaction.

Mais on ne doit pas y voir, Patrick Barrès insiste, une représentation figurative de ce qui se passe dans les récipients des chimistes. Tout n'est qu'évocation, suggestion... une vraie (al)chimie douce qui n'a rien contre quoi que ce soit. ■

G. Levitre et al., *Org. Lett.*, vol. 21(15), pp. 6005-6010, 2019.



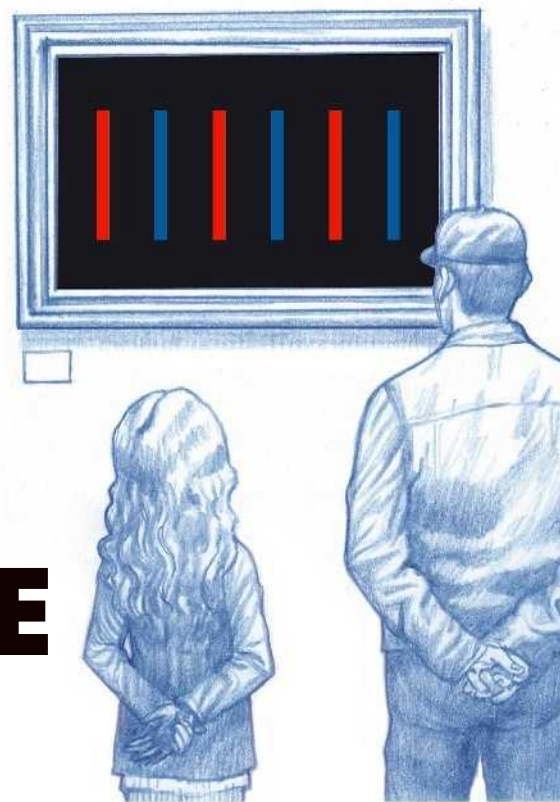
L'auteur a publié:
**Pollock, Turner, Van Gogh,
Vermeer et la science...**
(Belin, 2018)

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

DE LA PROFONDEUR AVEC DU ROUGE ET DU BLEU



Certaines images colorées, bien que planes, sont perçues comme ayant du relief. L'effet trouve son explication dans les aberrations chromatiques et la physiologie de l'œil humain.

Goethe l'a mentionné dans son *Traité des couleurs* de 1810 : quand nous regardons certaines images composées de rouge et de bleu, les parties rouges semblent saillantes par rapport au plan de l'image, tandis que les parties bleues paraissent en creux (*voir l'illustration ci-dessus*). Cet effet a été utilisé comme procédé pour donner en peinture une impression de profondeur.

L'origine de l'effet est en grande partie physique et tient aux aberrations chromatiques de l'œil, semblables à celles des objectifs photographiques de mauvaise qualité : selon leur couleur, ou plus exactement leur longueur d'onde, les rayons

lumineux ne sont pas déviés de la même façon lorsqu'ils passent de l'air à l'intérieur de l'œil ou de l'objectif.

QUAND LA LUMIÈRE SE DISPERSE

Les aberrations chromatiques résultent de la dispersion de la lumière, observée par exemple lorsqu'un prisme de verre décompose un pinceau de lumière blanche. À chacune des interfaces air-verre, la composante bleue de la lumière est davantage déviée que sa composante rouge. Plus généralement, la lumière émerge du prisme en étant dispersée selon les couleurs de l'arc-en-ciel.

Pour comprendre ce phénomène et être quantitatif, nous avons besoin de

l'indice de réfraction de chaque milieu traversé, rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans le milieu. Ce nombre caractérise l'intensité de l'interaction de la lumière avec le milieu et dépend de la longueur d'onde lumineuse, et c'est de lui dont dépend directement l'angle de déviation des rayons.

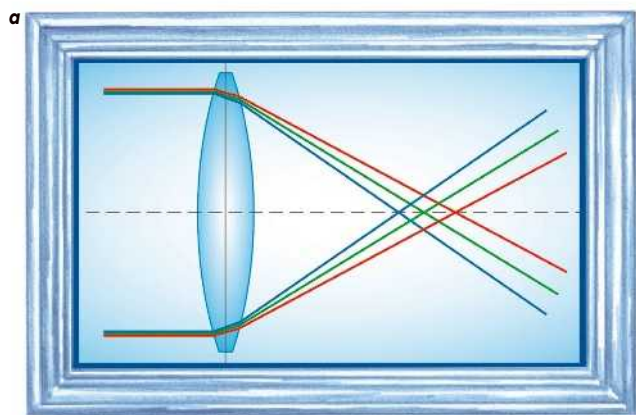
L'air, peu dense, a un indice moyen de 1,0003, proche de 1, et son caractère dispersif est en conséquence faible. Tel n'est pas le cas du verre, comme l'illustre l'expérience avec le prisme, ou, pour notre sujet, de la cornée : l'indice moyen de celle-ci est 1,37, très proche de celui de l'eau (1,33), mais il varie de 0,012 entre la lumière rouge (0,65 micromètre

ABERRATIONS CHROMATIQUES

L'indice de réfraction optique, dont dépend l'angle de déviation des rayons lumineux lorsqu'ils traversent l'interface de deux milieux, varie selon la longueur d'onde. Ainsi, lorsqu'un faisceau de lumière composite traverse une lentille convergente, les rayons se focalisent en des points plus ou moins distants selon leur longueur d'onde, donc selon leur couleur : la partie rouge de la lumière se focalise le plus loin, la partie bleue se focalise le plus près (a). Cette « aberration chromatique » de base a pour conséquence d'autres aberrations de même nature, par exemple du bleu qui, dans une image, bave sur le bord gauche d'un objet et du rouge qui bave sur son bord droit (b).



Les parties rouges des images paraissent saillantes par rapport aux parties bleues. Cet effet est dû aux aberrations chromatiques affectant les rayons lumineux quand ils entrent dans les yeux.



de longueur d'onde) et la lumière bleue (0,45 micromètre de longueur d'onde), aux deux bouts du spectre visible. Selon les lois de Descartes, avec un rayon incident à 45 degrés, on obtient un écart de 0,3 degré entre les rayons réfractés rouge et bleu.

Cet écart est du même ordre de grandeur que la dispersion dans les verres communs. Il paraît faible, mais a pourtant des conséquences pour les systèmes optiques fondés sur la réfraction. Par exemple, une lentille éclairée par un faisceau parallèle de lumière rouge et bleue focalisera la composante bleue en un point plus proche d'elle que la composante rouge (voir l'encadré ci-dessus). Cela signifie que les conditions pour former

l'image nette d'un objet bleu diffèrent de celles requises pour un objet rouge situé à la même distance.

On s'en aperçoit sur certaines photographies réalisées avec des objectifs de piètre qualité. Par exemple, si l'on a réglé l'objectif pour que la composante bleue d'un objet soit nette, alors la composante rouge sera floue et bavera sur le fond. Cet effet est bien visible lorsque la photographie présente des séparations franches entre un objet très clair et un fond sombre, ou inversement : le bord n'est pas net, mais paraît légèrement irisé.

Si l'on s'écarte du centre de l'image, ce qui correspond à des rayons lumineux d'angles d'incidence plus élevés, à l'effet de flou s'ajoute un décalage entre la partie

bleue et la partie rouge de l'image. L'irisation des bords des objets clairs s'accroît donc et on distingue un bord bleu d'un côté et rouge de l'autre !

Les aberrations chromatiques constituent un défaut que l'on peut corriger par des moyens optiques ou numériques, mais les céphalopodes (poulpes, calmars, etc.) l'ont peut-être tourné en avantage. Ces animaux n'ont qu'un seul type de cellules rétiniennes et ne voient donc qu'en

Les auteurs ont notamment publié : **En avant la physique !**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



> « noir et blanc ». Leur comportement montre pourtant qu'ils distinguent les couleurs. D'après une étude publiée en 2016 par les Américains Christopher et Alexander Stubbs, la forme très particulière de la pupille de ces mollusques aurait pour effet d'amplifier les aberrations chromatiques dans leur œil. Cela permettrait aux céphalopodes, à partir des différences de netteté des images formées sur leur rétine, de discriminer les couleurs.

LA VISION BINOCULAIRE DONNE DU RELIEF AUX COULEURS

Pour en revenir à l'œil humain, comment les aberrations chromatiques conduisent-elles à une illusion de relief? On remarque aisément que cet effet disparaît lorsqu'on ferme un œil. Il s'agit donc d'une conséquence de la vision binoculaire. Quand nous regardons un objet, nous orientons les yeux pour que son image se forme sur la fovéa, la région de la rétine où la concentration de cellules photoréceptrices est la plus élevée, c'est-à-dire où la résolution est la meilleure. Or la fovéa n'est pas située sur l'axe optique du système composé de notre cornée et notre cristallin: la direction de visée optique et l'axe optique sont décalés de 5 degrés.

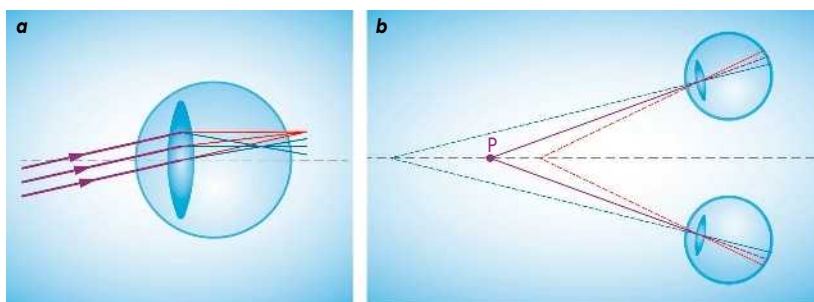
À cause de ce décalage angulaire, les rayons issus du point visé arrivent obliques par rapport à l'axe optique et on a donc les deux effets mentionnés plus haut: la distance de focalisation et la position latérale de la composante bleue des rayons diffèrent de celles de la composante rouge. Les yeux étant symétriques par rapport au milieu du visage, les décalages latéraux entre bleu et rouge sont inversés d'un œil à l'autre, et notre cerveau interprète cela comme une différence de distance (*voir l'encadré ci-dessus*).

Un calcul simplifié, en considérant un modèle rudimentaire d'œil avec la cornée comme surface réfractrice, confirme l'ordre de grandeur: la différence de profondeur apparente entre un objet bleu et un objet rouge situés à 80 centimètres des yeux est d'environ 16 millimètres, ce qui correspond bien à l'effet de profondeur perçu.

Reste que certaines personnes ne voient pas l'effet ou le voient inversé. Pourquoi? On s'est aperçu que la sensibilité des cellules rétinienne dépend de l'angle d'arrivée des rayons lumineux sur ces dernières: elle est cinq fois plus élevée pour les rayons qui passent par le centre de la pupille par rapport à ceux qui

DU RELIEF AVEC PAS MAL DE REGARD OBLIQUE...

Quand les rayons lumineux traversent l'œil de façon oblique, le point de focalisation de la composante rouge est non seulement un peu plus distant que celui de la composante bleue, mais les deux points sont aussi décalés latéralement (a). Quand on regarde un point P à une distance donnée (b), les yeux sont en fait dirigés vers un point plus distant afin que l'image de P se forme sur la fovéa, qui est décalée de 5 degrés par rapport à l'axe de l'œil. Les rayons issus de P arrivent alors de façon légèrement oblique par rapport à l'axe de l'œil. Si P est rouge, son image sur la rétine est décalée vers l'extérieur des deux yeux, tandis que si P est bleu, son image est décalée vers l'intérieur des deux yeux. En raison de cette différence angulaire, le cerveau interprète alors le point P rouge comme plus proche que le point P bleu.



passent par sa périphérie. C'est l'effet Stiles-Crawford.

Or à cause du décalage de la fovéa par rapport à l'axe optique, cet effet n'est pas symétrique. Autrement dit, la sensibilité pour les rayons passant par la gauche de la pupille diffère de celle pour les rayons passant par la partie droite. En fin de compte, tout se passe comme si la pupille effective, du point de vue optique, était décalée. Or un décalage de pupille affecte de façon différente les diverses couleurs, car cela revient à changer les angles d'incidence des rayons qui la traversent.

En mesurant cette variation de sensibilité chez diverses personnes, les chercheurs ont trouvé que l'effet Stiles-Crawford agit dans le sens contraire de l'aberration chromatique, jusqu'à éventuellement le compenser voire le surpasser – ce qui explique que, chez certains individus, l'effet de profondeur soit absent ou inverse.

L'explication est confirmée par le fait que lorsque l'image est très lumineuse, cette inversion du relief perçu disparaît. En effet, comme la pupille se contracte en réaction à la forte luminosité, les rayons arrivant sur la rétine ont tous des angles d'incidence à peu près égaux et sont alors tous perçus avec la même sensibilité par les cellules rétinienne; l'effet des aberrations chromatiques, avec le rouge qui jaillit de l'image et son bleu qui s'enfonce, reste alors entier. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Ozolinsh et K. Muizniece, **Color difference threshold of chromostereopsis induced by flat display emission**, *Frontiers in Psychology*, vol. 6, 337, 2015.

J. J. Vos, **Depth in colour, a history of a chapter in physiology optique amusante**, *Clinical and Experimental Optometry*, vol. 91(2), pp. 139-147, 2008.

J. Thompson et al., **Chromostereopsis : A multicomponent depth effect ?**, *Displays*, vol. 14(4), pp. 227-234, 1993.

J. J. Vos, **Some new aspects of color stereoscopy**, *Journal of the Optical Society of America*, vol. 50(8), pp. 785-790, 1960.

DURÉE LIBRE

Groupe Pour la Science - Siège social: 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris cedex 14 – Sarl au capital de 32 000€ – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z