

« OLO, une couleur que l'on n'avait jamais vue . . . »

science ou science-fiction ?

[version provisoire – août 2025]

Yvon Renotte, Dr Sci., enseignant-chercheur honoraire de l'Université de Liège

Past-prof invité, co-fondateur du HOOLAB, Dépt. AGO (Astrophysique)

y.renotte@uliege.be – <https://orbi.uliege.be/profile?uid=p041181> - www.linkedin.com/in/yvon-renotte-54a91a13

<https://hdl.handle.net/2268/335269>

Préambule

« **Une couleur que l'on n'avait jamais vue** » :

Que signifie effectivement cette affirmation ? A-t-on « créé » une « nouvelle couleur ? ou « existait-elle et on ne l'avait jamais vue ? si oui : pourquoi ? pourra-t-on en « créer » d'autres ?

Question subsidiaire : peut-il exister des couleurs visibles, donc ni dans l'ultra-violet ni dans l'infra-rouge, que l'on n'a jamais vues ? c'est-à-dire hors du spectre naturel humain ?

Comment a-t-on pu voir la couleur « olo » ? . . . du moins cinq personnes à ce jour . . . , autant de questions, et bien d'autres, que cette déclaration peut légitimement engendrer !

Je vais tenter « d'éclairer la situation » . . . ce qui n'est pas évident à priori, je l'admet volontiers !

Essai d'interprétation pour éviter les risques de confusion et de sensationnalisme.

[Introduction](#)

[Quelques rappels de colorimétrie](#)

- [La rétine, les bâtonnets et les cônes](#)

La rétine ; Les bâtonnets ; [Les cônes](#)

- [Les fonctions colorimétriques](#)

L'élément fondateur ; [Le triangle de Maxwell](#)

- [Le gamut d'un système](#)

- [Les espaces colorimétriques](#)

- [Le métamérisme](#)

- [Les teintes « lavées de blanc »](#)

[Méthodologie](#)

[Appellation OLO et plate-forme Oz](#)

[La procédure expérimentale](#)

- [Classification spectrale des cônes](#)

L'optique adaptative

L'OCT rétinienne (tomographie par cohérence optique)

AO-OCT (association de l'optique adaptative avec la tomographie par cohérence optique)

- [Suivi des mouvements oculaires en temps réel](#)

- [Stimulation des cônes M ; Deux LASERs](#)

- [Résultat perceptuel ; Un exemple](#)

- [Épilogue](#)

[Implications, perspectives et applications potentielles](#)

[Commentaires et critiques ; En résumé](#)

[Conclusion](#)

[Annexes](#)

- [Le facteur de luminance L*](#)

- [Les espaces chromatiques uniformes](#) CIELUV 1976 et CIELAB 1976

- [Conversion RGB – XYZ - LMS](#)

- [LMS vs RGB et XYZ - récapitulatif](#)

Introduction

Mon attention a récemment été attirée par un article de *Marc Gozlan* paru dans *le Monde – Sciences, Réalités biomédicales* du 24 avril 2025, intitulé « *Une couleur jamais vue révélée par un faisceau LASER dans l'œil* »¹. Lui-même résumé de l'article original d'un groupe de chercheurs américains² des Universités de Berkeley et de Seattle, publié dans *Science Advances – Cognitive Neuroscience* du 18 avril 2025, dont le titre est, disons, moins « provocateur ». *Ils appellent cette (super)couleur « olo »*. Diverses revues scientifiques ou non, et media ont « emboîté le pas », le plus souvent sans trop de précision ni expliquer de quoi il s'agit effectivement, . . . en restant dans un « certain flou », de quoi intriguer « monsieur Tout-le-Monde », peut-être entretenir un « certain degré de mystère » auprès du grand public ?

Au départ, je me méfiais d'ailleurs du titre quelque peu racoleur, sachant que même d'excellents journalistes scientifiques peuvent « *se laisser emporter* » par la relation d'un sujet un peu « à la limite ». J'étais également « un peu effrayé » par les risques pouvant être engendrés par l'idée d'adresser directement un faisceau LASER dans l'œil. Heureusement, comme on pouvait s'y attendre de la part de scientifiques hautement spécialisés, il apparaît après examen détaillé de l'article lui-même que les points potentiellement « à risque » ont été traités comme il convient par les auteurs.

Certains aspects de l'article demeurent toutefois ambigus mais l'approche est globalement fort intéressante, originale et le résultat « perturbant » . . . en souhaitant que les biais évoqués supra soient (un jour) détaillés et justifiés faute de quoi, à mon avis, un doute pourrait subsister sur l'interprétation des résultats. Les auteurs en conviennent d'ailleurs dans leurs conclusions et perspectives.

Reste que la lecture de l'article lui-même n'est pas simple, les auteurs ayant adopté une approche peu courante en photo-colorimétrie, ce qui nécessite, je crois, que le(a) lecteur(trice) ait une relativement bonne connaissance préalable du domaine, et curieusement peut-être de son évolution historique.

En effet, ils n'utilisent pas une représentation « classique » via les diagrammes de chromaticité prescrits par la **CIE** (Commission Internationale de l'éclairage fondée en 1913 à Berlin) qui sont régulièrement en usage depuis 1931, actuellement sous une version adoptée en 1976, même si des aménagements plus récents, spécialement adaptés, ont été introduits à mesure de l'évolution et de l'avancement des techniques numériques d'enregistrement et de reproduction des couleurs³. Ils ne présentent pas leurs résultats en « version classique » *RGB* ni *CIE-XYZ 1931*, mais sur les « *triangles chromatiques* » tels ceux proposés par Maxwell vers 1850⁴. Et ils utilisent ***l'espace colorimétrique SML*** sans doute peu/moins familier à l'utilisateur moyen mais le mieux adapté au cas traité pour l'interprétation de leurs résultats puisque nous verrons qu'ils agissent directement sur des cellules photosensibles rétiennes, des cônes. Le(a) lecteur(trice) peu ou non averti(e) devra donc se (re)familiariser avec ces concepts développés *in texto* et en annexes.

-
1. Marc Gozlan, *Une couleur jamais vue, révélée par un faisceau laser dans l'œil*, Le Monde – 28 avril 2025, https://www.lemonde.fr/realites-biomedicales/article/2025/04/24/une-couleur-jamais-vue-revelee-par-un-faisceau-laser-dans-l-il_6599685_6579630.html ; Louise Le Ridant, « *Olo* » : une nouvelle couleur jamais vue révélée par la stimulation de la rétine, Pour la Science, 573 (juillet 2025), <https://www.pourlascience.fr/sd/neurosciences/olo-une-nouvelle-couleur-jamais-vue-revelee-par-la-stimulation-de-la-retine-27799.php> ; *Une nouvelle couleur indécelable à l'œil humain*, Sciences et Avenir, 940 (juin 2025), 19 ; Elise Morel (Le Journal du Dimanche), *Qu'est-ce que la nouvelle couleur « olo » ?*, <https://www.lejdd.fr/Societe/quest-ce-que-la-nouvelle-couleur-olo-157526> ; Axel Juin (RTL), *Olo : quelle est cette "nouvelle couleur" mise au point par la science ?*, <https://www rtl.fr/actu/international/olo-quelle-est-cette-nouvelle-couleur-mise-au-point-par-la-science-7900497306> ; *Science*, <https://briefstory.io/posts/des-scientifiques-ont-decouvert-une-nouvelle-couleur--olo--> ;
 2. James Fong, Hannah K. Doyle, Congli Wang, Alexandra E. Boehm, Sofie R. Herbeck, Vimal Prabhu Pandiyan, Brian P. Schmidt, Pavan Tiruveedhula, John E. Vanston, William S. Tuten, Ramkumar Sabesan, Austin Roorda, Ren Ng, *Novel color via stimulation of individual photoreceptors at population scale*, *Sci. Adv.* **11**, eadu1052 (18 April 2025), 11 pages
 3. Yvon Renotte, *La couleur, une question simple ?* <https://hdl.handle.net/2268/258726>
 4. James C. Maxwell, *Experiments on colour, as perceived by the eye, with remarks on colour-blindness*. *Earth Environ. Sci. Trans. R. Soc. Edinb.* **21** (1857), 275–298 ; Thibault Laurent, *Couleurs et mathématiques*, CNRS – Toulouse School of Economics , (19-06-2021), [Couleurs et mathématiques.pdf](https://www.ceram.toulouse-school-of-economics.fr/2021/06/19/couleurs-et-mathematiques.pdf)

En résumé, l'originalité de l'article réside dans le but des auteurs qui est de vérifier si le cerveau humain réagit de la même manière à un éclairage monochromatique (en l'occurrence vert) agissant « normalement » sur des cônes différents (cas d'un *éclairage habituel* de la rétine) et au même éclairage « *spécifiquement adressé* » à un seul type de cône (en l'occurrence les cônes M dont le maximum de sensibilité est situé dans le vert) ?

L'article est sensé fournir une réponse à cette interrogation : *NON* !

NON parce que les patients recevant un éclairage LASER monochromatique vert « normal » (sur les cônes L, M et S), correctement adapté pour éviter tout accident rétinien, déclarent voir la couleur spectrale verte correspondante. Lorsque le même rayonnement est adressé (presque) uniquement au cônes M (principalement sensibles au vert), les patients déclarent par contre voir une couleur différente, baptisée « *olo* », sorte de « *grenat* » sursaturée, *hors de l'espace colorimétrique de l'œil humain*. Ces notions seront précisées dans le texte.

Quelques rappels de colorimétrie

NB. Un volume de rappels « assez important » relatifs aux espaces colorimétriques est proposé dans la note. Il est principalement destiné aux lecteurs(trices) peu ou non initiés afin de les aider à comprendre « plus aisément » certains aspects de l'article qui leur sont probablement peu/pas familiers et en quoi consiste le phénomène étudié. Il va de soi que le lecteur(trice) suffisamment initié pourra « survoler » ou « sauter » tout ou partie de ces notes en fonction de son degré de connaissance préalable du domaine.

La colorimétrie est un ensemble de méthodes et de données permettant de spécifier les couleurs de manière universelle.

- **La rétine, les bâtonnets et les cônes**⁵

La rétine, couche de l'œil sensible à la lumière, tapisse l'arrière du globe oculaire autour de la *fovéa*, terminaison du nerf optique. Elle possède deux espèces de photorécepteurs : les *cônes* et les *bâtonnets*. Les premiers sont eux-mêmes de trois types : S (bleus), M (verts) et L (rouges).

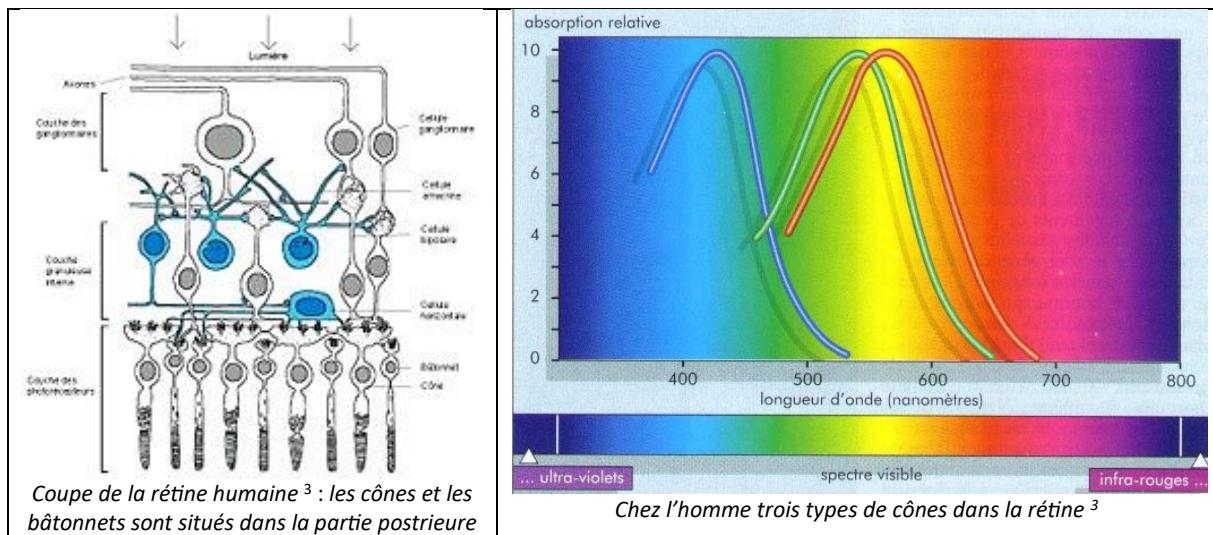
Les bâtonnets, de forme allongée, lui doivent leur nom. En moyenne 92 millions, quasiment absents de la *fovéa*, ils se logent principalement à la périphérie. Leur densité semble maximale au sein de la rétine supérieure. Ils ont une (très) faible perception des détails et des couleurs mais sont très sensibles aux variations d'éclairage, même faibles. *Ils sont adaptés à la vision nocturne (scotopique)*. Ils contiennent une substance chimique appelée *rhodopsine* ou *pourpre rétinien*. Quand la lumière frappe une molécule de *rhodopsine*, celle-ci génère un faible courant électrique. Les signaux ainsi recueillis forment un message qui est transmis aux cellules nerveuses de la rétine et au cerveau via le nerf optique.

Les cônes : environ 5 à 7 millions principalement logés dans et autour de la *fovéa*, sont très sensibles à de très faibles éclairages, possèdent une très grande perception des détails et des couleurs : *ils sont adaptés à la vision diurne (photopique)*. Trois types existent selon le pigment qu'ils contiennent d'où une sensibilité à des ondes lumineuses de longueurs d'onde différentes : les cônes L contenant de l'*erythropsine* (sensibles au rouge : 564 nm), les M de la *chloropsine* (sensibles au vert : 533 nm) et les S de la *cyanopsine* (sensibles au bleu : 437 nm).

L'existence de ces trois types de cônes est responsable du principe de la trivariance et de la vision trichromatique suspectée par Newton, initiée par Young, démontrée par Maxwell et propagée par Helmholtz⁶.

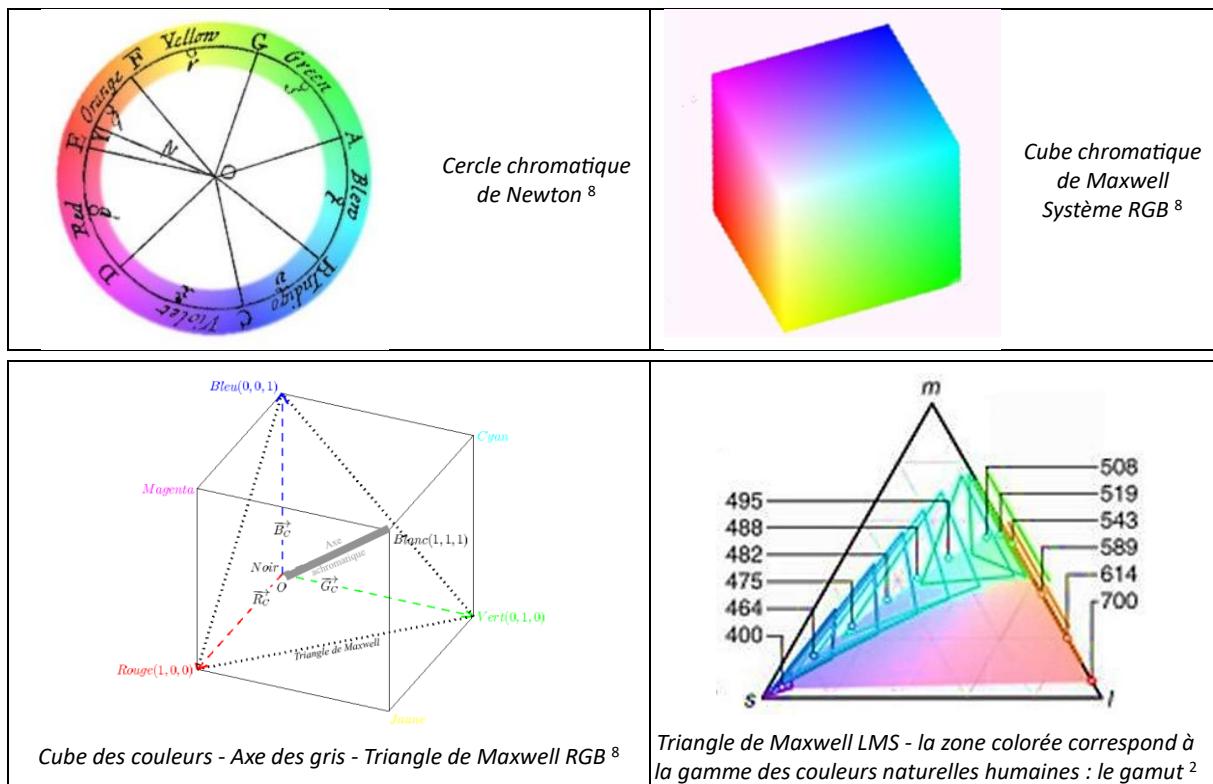
5. Damien Gatinel, *Densité spatiale des photorécepteurs rétiniens*, Accueil « Recherche / Education », Quantité et qualité de vision, <https://www.gatinel.com/recherche-formation/acutee-visuelle-definition/densite-spatiale-des-photorecepteurs-retiniens/> ; Systèmes sensoriels / Système visuel, https://fr.wikibooks.org/wiki/Syst%C3%A8mes_sensoriels/Syst%C3%A8me_Visuel <https://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%A2tonnet> ; [https://fr.wikipedia.org/wiki/C%C3%B4ne_\(photor%C3%A9cepteur\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/C%C3%B4ne_(photor%C3%A9cepteur))

6. Yvon Renotte, *Il n'y a pas de couleur sans lumière . . . mais il y a couleurs . . . et couleurs*, Document pédagogique (2024), 17 pages, <https://hdl.handle.net/2268/323862> ; PromOptica NewsLetter 7, novembre 2024, 3 pages



- **Les fonctions colorimétriques** : la représentation « analytique » des sensations colorées

La couleur n'est pas une grandeur physique, elle ne peut pas être représentée par un nombre suivi d'une unité. C'est une « sensation » dont la « représentation quantifiée » a nécessité le passage par plusieurs étapes physio-analytiques complexes pour aboutir aux systèmes aujourd'hui préconisés par la *Commission Internationale de l'Éclairage*. Sans (trop) entrer dans le détail de cette progression décrite ailleurs^{3,6}, nous nous limiterons à un simple récapitulatif en insistant néanmoins sur certains aspects parfois peu familiers, utiles ici.



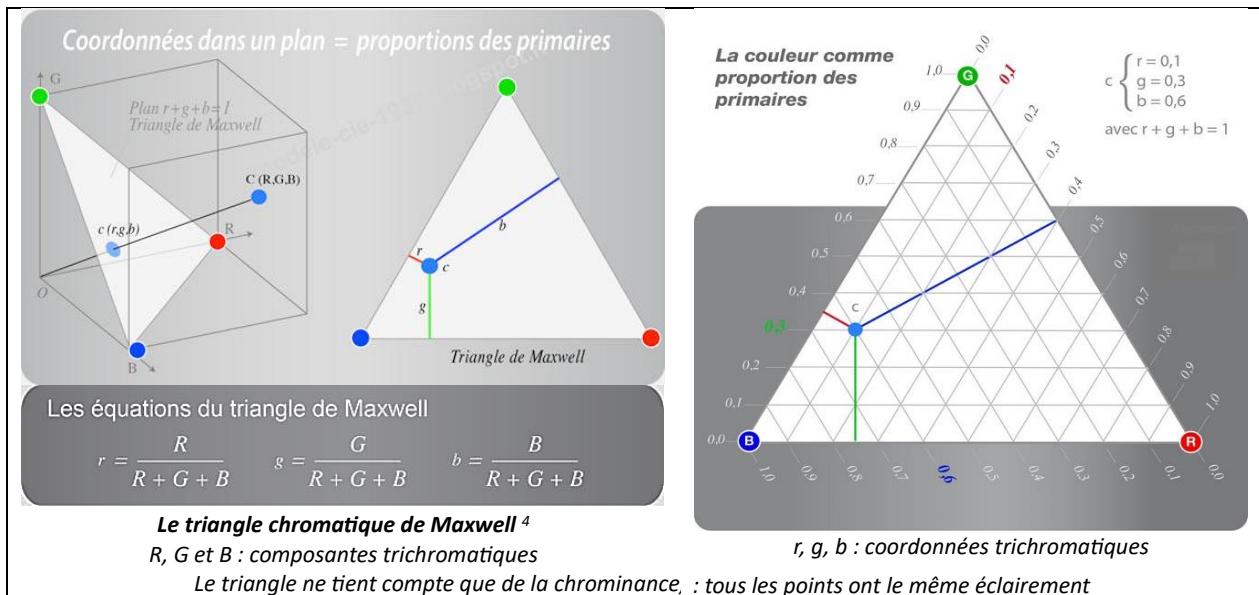
L'élément fondateur : 1666, I. Newton montre que la lumière blanche est composée, et par extension que d'autres couleurs peuvent également être décomposées en teintes monochromatiques. Il tente d'organiser les couleurs dans un *cercle chromatique* qu'il divise en sept couleurs : rouge, orange, jaune, vert, bleu, indigo et violet⁷. Une source de lumière pourra ainsi être qualifiée par son spectre d'émission qui donne la proportion de chacune de ses composantes colorées. Il ne peut pas utiliser les

7. https://fr.wikipedia.org/wiki/Cercle_chromatique

notions de longueur d'onde ni de fréquence pour caractériser les teintes spectrales puisqu'il faudra attendre que *Th. Young* prouve expérimentalement la nature ondulatoire de la lumière au début du 19^e siècle et énonce en 1801 le principe de la *trivariance*, base du *principe de trichromie* qui énonce que, pour la perception visuelle, toute couleur peut être reproduite par un mélange adéquat de trois couleurs, *dites primaires*, en proportion unique. Il montre que trois couleurs spectrales convenablement choisies (le mélange de deux ne donne pas la troisième) sont suffisantes pour reconstituer le blanc. Par imitation de la perception visuelle, il choisit le rouge, le vert et le bleu.

Les *lois d'association* de *H. Grassmann*, la *technique d'égalisation des couleurs* et la *trivariance* de *Th. Young* permettront le développement d'*espaces colorimétriques* efficaces⁸.

Dans la foulée, au milieu du 19^e siècle, *J.C. Maxwell* propose une représentation vectorielle 3D de l'espace trichromatique dont les coordonnées sont les « quantités » de chacune des teintes primaires R (lumière rouge), G (lumière verte) et B (lumière bleue) permettant de reconstituer, par comparaison, la couleur « analysée » : l'orientation du vecteur résultant correspond à sa teinte (chromaticité), sa longueur à son intensité (luminance ou éclairement). Les coordonnées d'un vecteur couleur C sont les composantes trichromatiques R_C , G_C et B_C . Les points correspondant à des stimuli de couleur dont les composantes trichromatiques sont positives sont contenues dans un cube, connu sous le nom de *cube des couleurs RGB* qui correspond à la synthèse additive des couleurs. On peut en concevoir d'autres basés sur d'autres choix de primaires, par exemple *CMY* (cyan, magenta et jaune) correspondant à la synthèse soustractive. L'origine (0,0,0) correspond au *noir* tandis que le *blanc de référence* est défini par le mélange unitaire des trois primaires (1,1,1). La droite passant par les points (0,0,0) et (1,1,1) est appelée *axe des gris, des couleurs neutres ou encore achromatique*, elle représente des nuances de gris allant du noir au blanc. Elle a pour équation $R_C = G_C = B_C$. Le plan perpendiculaire à cet axe et passant par les sommets R (1,0,0), G (0,1,0) et B (0,0,1) définit un triangle équilatéral dont les sommets sont les primaires : le **triangle de Maxwell**. C'est une représentation 2D, donc un plan d'égale luminosité pour toutes les couleurs qui s'y trouvent. Le passage des composantes trichromatiques aux coordonnées trichromatiques permet de représenter la chrominance par deux composantes, la troisième étant le paramètre « quantité » communément appelé « l'intensité » (luminance ou éclairement selon les circonstances).



8. Eric Marchand, *Colorimétrie*, Université de Rennes 1,
<https://people.rennes.inria.fr/Eric.Marchand/ESIR/ESIR2/BINP/couleur.pdf>
 Jean-Jacques Embrechts, *Introduction to colorimetry*, University of Liege (2010),
<https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/121075/1/Intro%20colorimetry.pdf> ,
 Grassmann, *Les lois d'association*, https://fr.wikipedia.org/wiki/Hermann_G%C3%BCnther_Grassmann

- **Le gamut d'un système** est défini par le volume des couleurs qu'il est capable de « réaliser », exprimé dans un espace colorimétrique de référence⁹. **Le gamut de la vision humaine**, aussi appelé *espace colorimétrique de l'œil humain*, représente donc l'ensemble des couleurs que l'œil humain est capable de percevoir. Il s'agit d'une étendue tridimensionnelle complexe qui englobe toutes les variations de teinte, de saturation et de luminosité que notre système visuel peut distinguer. Dans le triangle de Maxwell, et plus généralement dans tous les espaces chromatiques définis ultérieurement, il correspond au « lieu du spectre » plus la « droite des pourpres ». La notion joue un rôle important pour la compréhension de l'article.

- **Les espaces colorimétriques**

Au début du 20^e siècle, *J. Guild* et *W. D. Wright* ont conduit des expériences dans lesquelles ils présentaient à un échantillon de la population dépourvu de défaut visuel, des combinaisons de trois couleurs du spectre (le rouge, le vert et le bleu) avec des proportions différentes dans le but de les faire correspondre avec des couleurs à l'intérieur du gamut humain. Ces travaux conduiront à *l'espace CIE-RGB* en 1931^{10,11}. Lors de leurs expérimentations, ils se sont rendu compte qu'on ne pouvait pas reproduire certaines couleurs du spectre comme le jaune. En revanche, en ajoutant au jaune du violet, il est possible de trouver une combinaison de couleurs rouge/vert/bleu identique, ce qu'ils expriment en introduisant des « *quantités de rouge négatives* ». C'est pour éviter ces valeurs négatives que la CIE est passée dès 1931 au **système CIE-XYZ** en adaptant les repères pour que toutes les composantes soient positives. Des adaptations destinées à mieux équilibrer les contributions respectives des couleurs fondamentales sont intervenues en 1960 (**CIE-LUV**) et en 1976 (**CIE-LU'V'**) dans lesquels *L* est *l'intensité* (luminance / éclairement).

En colorimétrie, la lumière est un stimulus qui déclenche une sensation de couleur. Or la vision en couleur commence avec l'absorption des photons par les pigments visuels contenus dans les cônes de la rétine. Ainsi, la lumière, en tant que stimulus, peut être définie par les trois signaux *L*, *M*, *S* qu'elle déclenche dans les cônes et qui constituent les signaux d'entrée sur le système visuel. **L'espace colorimétrique LMS** (long, medium, short) représente la réponse des trois types de cônes présents dans la rétine de l'œil humain, nommés d'après leur pic de sensibilité aux longueurs d'onde longues (*L*), moyennes (*M*) et courtes (*S*). Directement lié à la physiologie de la vision humaine, il est courant de l'utiliser pour des applications bio-médicales¹².

⁹) ne pas confondre les significations des notations *L* des systèmes LMS et CIE-LUV.

Il s'est notamment avéré utile dans l'étude du daltonisme, lorsqu'un ou plusieurs types de cônes sont défectueux. Contrairement aux espaces RGB ou CIE XYZ, le LMS est « biologiquement fondé ». Il modélise la façon dont notre système visuel perçoit la lumière en stimulant les cônes. Cela le rend particulièrement utile pour interpréter et traiter des applications liées à la vision. Des matrices de transformation permettent de passer des espaces RGB et XYZ à LMS, et vice versa [cf. détails en annexes].

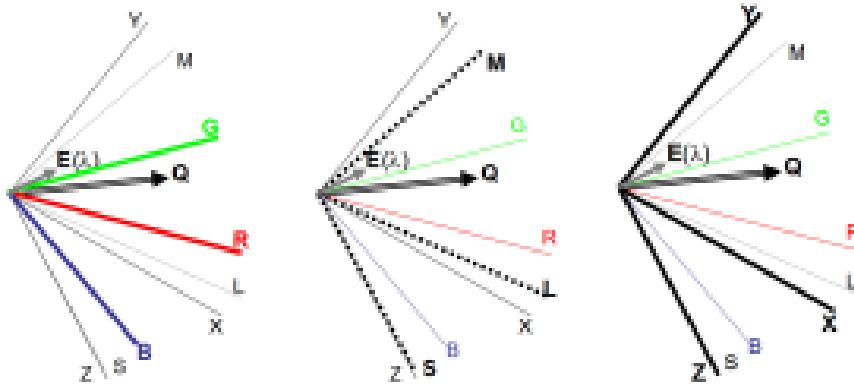
Certains formats d'image avancés, comme JPEG XL, utilisent un espace dérivé de LMS mieux adapté à la compression tout en respectant la perception humaine. Ce système permet de réduire les données sans nuire à la qualité visuelle, notamment dans les tons bleus, grâce à la densité moindre des cônes *S* dans l'œil.

9. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Gamut> ; Arnaud Frich, *Guide de la gestion des couleurs* (2015, mis à jour en 2025), <https://www.guide-gestion-des-couleurs.com/espaces-couleurs-gamut.html>

10. https://fr.wikipedia.org/wiki/CIE_RGB ; https://fr.wikipedia.org/wiki/Commission_internationale_de_l%27clairage ; <https://cie.co.at/> ; Daniel Metz, *Module 10 – Le modèle CIE 1931*, <https://modele-cie-1931.blogspot.com/2015/07/10-les-travaux-de-wright-et-guild.html>

11. John Guild, *The geometrical solution of colour mixture problems*, Trans. Opt. Soc. London, 27 (1925-26), 139-174 ; *The colorimetric properties of the spectrum*, Phil. Trans. Roy. Soc. London, A230 (1931), 149-187 ; William David Wright, *A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours*, Trans. Opt. Soc. London, 30 (4) (1928-29), 141-164

12. https://en.wikipedia.org/wiki/LMS_color_space



Représentation de la couleur Q et d'un rayonnement monochromatique $E(\lambda)$ dans les espaces colorimétriques RGB, LMS et XYZ. La figure est reproduite en trois exemplaires pour accentuer les trois axes de chaque espace.
La représentation dans planaire rend difficilement compte de la structure tridimensionnelle de chaque espace.¹³
coordonnées : $s = S / T$; $m = M / T$; $\ell = L / T$; $T = S + M + L$

L'industrie, de plus en plus automatisée, a eu un besoin croissant d'une méthodologie permettant de déterminer par calcul un écart chromatique ce que le système de coordonnées CEI-XYZ ne permettait pas parce que *non-uniforme*. Il a donc fallu définir un nouvel *espace uniforme* en le « déformant mathématiquement ». De nombreux essais ont été tentés jusqu'au début des années 1970 où la CIE propose / recommande (ne pouvant les départager en raison de leurs champs d'application nettement différents) en 1976 deux espaces chromatiques uniformes notés **CIELUV** ($L^*u^*v^*$) et **CIELAB** ($L^*a^*b^*$) dans lesquels la luminosité est réintroduite sous la notation L^* , forme « *normalisée en pourcentage* » de L . Le premier est très pratique pour la mesure des mélanges additifs de lumières colorées tels le système RVB en télévision. Le second est généralement préféré pour les utilisations de pigments car il permet une bonne estimation des couleurs résultant de pigment en mélanges. Le passage d'un système à l'autre est relativement complexe. Le(la) lecteur(trice) intéressé(e) consultera utilement des ouvrages spécialisés¹⁴. [facteur de luminance L^* et espaces chromatiques uniformes : cf. détails en annexes]

- Le métamérisme

On notera que la perception des couleurs n'est pas seulement spectrale comme le système auditif, mais intégratrice. Il en résulte les propriétés de *métamérisme* : *pour égaler une couleur, il n'est pas nécessaire de reconstituer sa composition spectrale*. Plusieurs spectres différents peuvent être perçus visuellement comme la même teinte par plusieurs personnes. **Deux stimuli lumineux donnant la même impression colorée sont dits métamères, ils s'égalisent « perceptuellement » mais pas physiquement**¹⁵.

- Les teintes « lavées de blanc »

Quelle est la longueur d'onde de la teinte « *rose bonbon* » ? Elle n'en a pas car seules les teintes chromatiques du lieu du spectre sont caractérisées par une longueur d'onde. Mais depuis la Maternelle, les bambins apprennent plus ou moins intuitivement qu'en mélangeant une couleur rouge spectrale avec une quantité plus ou moins importante de couleur blanche on peut obtenir toute une gamme de roses, plus ou moins clairs ou plus ou moins rouge ! Un peu comme on peut obtenir une échelle de gris en mélangeant la couleur noire avec une quantité croissante de blanc. On définira donc la couleur « *rose bonbon* » C en traçant sur le diagramme chromatique utilisé une demi-droite allant du « blanc pur, équi-énergétique » W (barycentre du triangle de Maxwell ; [1/3,1/3] sur x,y CIE-1931),

13. Françoise Viénot et Jean Le Rohellec, *Colorimétrie et physiologie : la spécification LMS*, HAL id hal-01565889 (2017) – Open Science, <https://hal.science/hal-01565889v1>

14. Yves Dordet, *Colorimétrie – Principes et applications*, éd. Eyrolles (1990), 53-84 ; Paul Kowalski, *Vision et mesure de la couleur*, Masson – Physique fondamentale et appliquée (1990), 156-181 ; *Recueil des méthodes internationales d'analyse – OIV, Caractéristiques chromatiques selon CIE-Lab*, OIV-MA-AS2-11 : R2006, 17 pages

15. Günter W. Wyszecki, *Evaluation of metameric colors*, J. Opt. Soc. Am., 48 (7) (1958), 451-454 ; Correlate for brightness in terms of CIE chromaticity coordinates and luminous reflectance, J. Opt. Soc. Am., 57 (2) (1967), 254–257

à un point R du lieu du spectre (rouge de longueur d'onde dominante λ_R connue) en passant par le point C caractéristique du rose considéré. Cette couleur est définie par *la longueur d'onde dominante* (rouge) λ_R évoquée supra et *le facteur de pureté p* égal à la fraction de blanc mélangée au rouge : $p = WC/WR$ (généralement exprimé en %). Ce sont les deux paramètres de chrominance auxquels s'ajoute l'intensité ambiante (la trivariance est donc respectée) ¹⁶.

Méthodologie

L'article explore une nouvelle frontière de la perception visuelle en démontrant qu'on peut élargir notre expérience des couleurs grâce à une précision extrême dans la stimulation des cellules de la rétine. Traditionnellement, notre perception des couleurs repose sur la stimulation combinée de trois types de cellules photoréceptrices dans nos yeux : les cônes L (rouge), M (vert) et S (bleu). Cependant, certaines combinaisons de stimulations ne se produisent jamais dans la nature.

Les chercheurs concernés ont donc développé une technologie « révolutionnaire », qu'ils ont baptisée **Oz**, qui permet de stimuler individuellement chaque photorécepteur sur la rétine avec une précision extrême. *Oz est une plate-forme extrêmement sophistiquée et performante regroupant plusieurs « outils » permettant de gérer les manipulations les plus complexes, de collecter et traiter les résultats.* Grâce à cela, ils ont réussi à produire une couleur entièrement nouvelle, *jamais vue auparavant*, appelée "**olo**". Cette couleur est décrite comme un bleu-vert d'une saturation sans précédent, « *différente de tout ce que nous connaissons* ».

L'idée de base est qu'en contournant les limites biologiques de notre système visuel, on peut élargir l'éventail des couleurs perçues. Et ces nouvelles couleurs ne figurent pas dans le spectre de la lumière naturelle ni dans aucun écran ou peinture. *Ainsi, la technologie Oz permet d'explorer des territoires chromatiques inexplorés, révélant des couleurs « hors gamut » (humain), qui étaient donc invisibles jusqu'à présent.*

Les chercheurs ont déterminé les coordonnées LMS de "olo" en utilisant un *protocole de color matching* rigoureux combiné à une stimulation ciblée des cônes rétiniens. "Olo" correspond à une activation exclusive des cônes M, avec des coordonnées idéales dans l'espace LMS de (L, M, S) = (0, 1, 0). *Les caractéristiques perceptuelles de "olo" incluent une teinte bleu-vert extrêmement saturée et une saturation jugée "au-delà de tout ce qu'ils avaient vu". Il s'agit donc d'une avancée fascinante dans notre compréhension des limites et des possibilités de la vision humaine, grâce à la technologie Oz qui permet de révéler des couleurs inédites, . . . du moins « une » aujourd'hui !*

L'appellation « olo » attribuée à la couleur, normalement invisible, est un clin d'œil à la stimulation spécifique des cônes M, la rendant unique et différente de toute autre couleur visible par l'œil humain dans des conditions normales. Elle a été nommée ainsi en raison de son positionnement dans l'espace colorimétrique tridimensionnel LMS, de coordonnées (0,1,0). Elle est caractérisée par une activation maximale des cônes M et (quasiment) aucune des autres cônes. Par « analogie graphique », la *notation numérique* (0,1,0) est devenue l'acronyme « **olo** » dans les échanges courants entre les chercheurs concernés.

La plate-forme prototype Oz fait référence au livre « *Le Magicien d'Oz* » de Lyman Frank Baum (1900) (*) et aux films éponymes (1910, **1939** et 1982). Dans cet ouvrage, les habitants de la *Cité d'Émeraude*, la ville du Magicien Oscar Z. Diggs qui se fait appeler « *Oz le Grand et Terrible* », *capitale du pays d'Oz*, portent des lunettes vertes pour protéger leurs yeux de la lumière vive et étincelante de la ville, mais aussi pour créer un effet visuel distinctif et mystérieux. *Le vert devient ainsi emblématique de cet univers, représentant la magie, l'illusion et un monde au-delà de la réalité ordinaire*¹.

*) Lyman F. Braun, *Le Magicien d'Oz*, ed. George M. Hill Co (1900), https://fr.wikipedia.org/wiki/Le_Magicien_d%27Oz ; [https://fr.wikipedia.org/wiki/Le_Magicien_d%27Oz_\(film,_1939\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Le_Magicien_d%27Oz_(film,_1939))

La procédure expérimentale

Elle nécessite l'application d'un protocole rigoureux et d'une succession d'opérations complexes permettant d'identifier les différents types de cônes sur un élément de la rétine des « cobayes », de

16. https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_chromaticit%C3%A9

selectionner ceux que l'on souhaite traiter, en l'occurrence les cônes M, et de les éclairer correctement. En même temps, il faut collecter les informations utiles auprès des sujets traités et en extraire les résultats. Pour ce faire, il a fallu mettre en œuvre un matériel très spécialisé, pas nécessairement dédié, à priori, aux traitements appliqués.

Pour sélectionner les cônes M (Medium wavelength), puis les activer de manière sélective dans le système Oz, les chercheurs ont suivi une *série d'opérations hautement techniques* détaillée ci-après dans le cadre du principe Oz, à l'aide d'un système sophistiqué spécifiquement conçu, basé sur un « **ophthalmoscope à balayage avec optique adaptative (AOSLO)** », enrichi de plusieurs composants de haute précision.

- Classification spectrale des cônes

Avant toute stimulation, les chercheurs doivent connaître la nature de chaque cône dans une zone précise de la rétine. L'opération est effectuée par imagerie **AO-OCT (Optical Coherence Tomography avec Optique Adaptative)** : cette technique permet de cartographier environ 1 000 à 2 000 cônes rétiniens tout en identifiant leur type spectral (L, M ou S) en fonction de leur réponse optique. Grâce à cela, chaque cône est préclassé comme L, M ou S.

L'Optique Adaptative, initialement développée pour l'astronomie afin de corriger les distorsions causées par les turbulences atmosphériques, a été adaptée à l'ophtalmologie pour compenser les aberrations optiques inhérentes à l'œil humain qui peuvent être causées par divers facteurs tels les imperfections de la cornée et du cristallin¹⁷. Son application permet d'augmenter la résolution des images formées sur la rétine et une observation plus précise de celle-ci. En ophtalmologie, cette technique d'imagerie permet donc d'améliorer considérablement la qualité des images en même temps qu'observer les photorécepteurs individuels et le système vasculaire rétinien, ouvrant ainsi des perspectives pour la compréhension et le diagnostic des maladies de la rétine. En d'autres termes, l'OA est une technologie qui modifie *en temps réel* les aberrations du front d'onde oculaire notamment grâce à l'utilisation de miroirs déformables.

Le système d'OA comprend généralement [voir encadré p.10] :

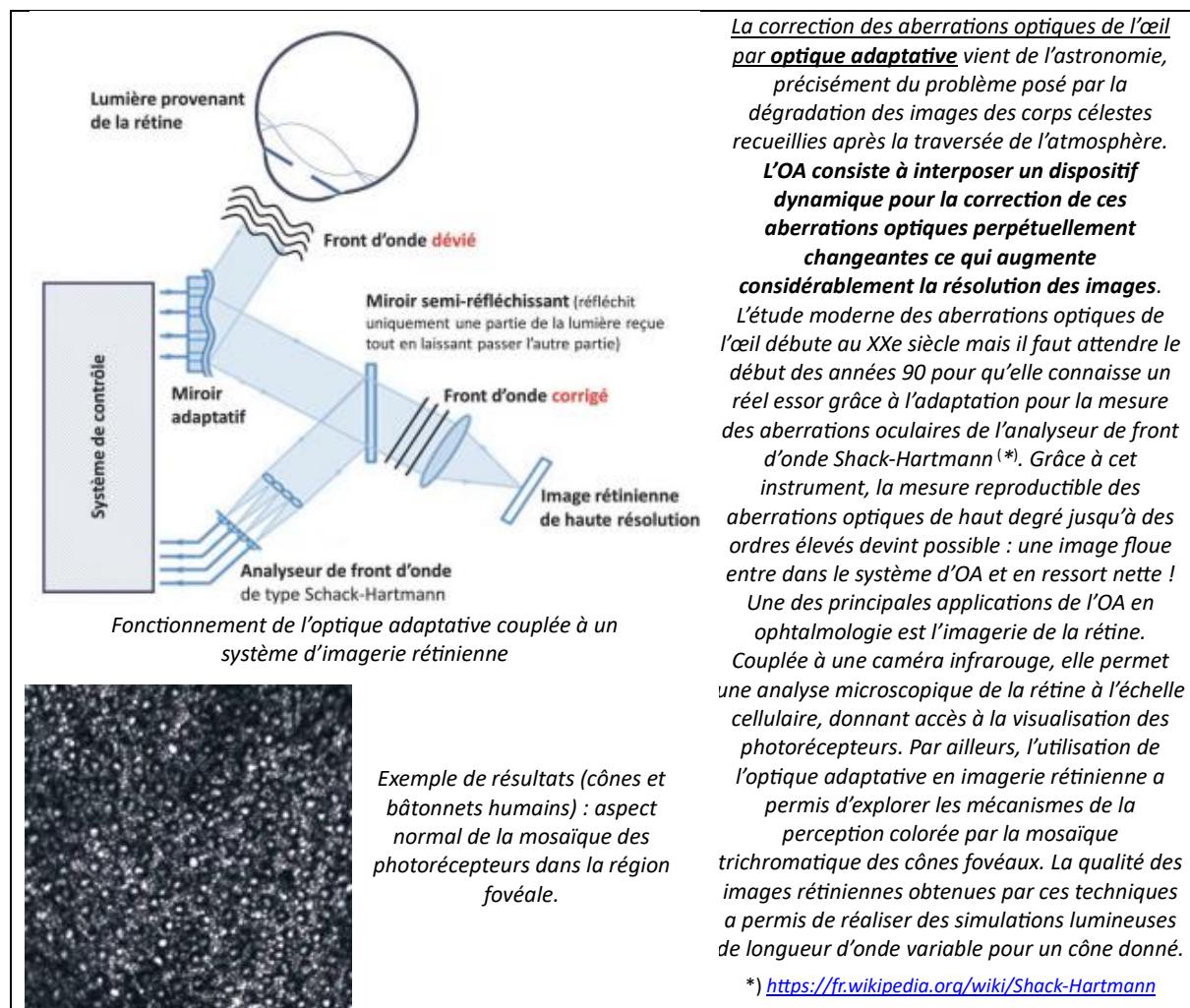
- Un analyseur de front d'onde qui mesure les aberrations qui affectent le faisceau qui émerge de l'œil après avoir traversé la rétine. L'analyseur de Shack-Hartmann est couramment utilisé à cette fin.
- Un miroir déformable (ou un modulateur de lumière) dont la surface est ajustée dynamiquement par de nombreux actionneurs pour compenser les aberrations détectées. En déformant le miroir de manière appropriée, le front d'onde est corrigé avant d'atteindre le capteur imageant.
- Un système de contrôle en boucle fermée (un ordinateur) analyse en continu les données issues de l'analyseur et envoie les commandes utiles aux actionneurs du miroir déformable pour maintenir la correction optimale.

L'OCT rétinienne, ou **tomographie par cohérence optique**¹⁸ de la rétine, est un examen d'imagerie médicale non invasif utilisé en ophtalmologie pour visualiser et analyser en détail les différentes couches de la rétine et du nerf optique. Il permet de réaliser des images en coupe transversale de ces tissus avec une très haute précision, offrant une évaluation précise de leur épaisseur et de leur structure. Il est comparable à une "biopsie virtuelle" ou un "scanner" de la rétine mais utilise la lumière

17. Damien Gatinel, *L'optique adaptative pour l'étude et la correction des défauts optiques de l'œil humain*, Réalités Ophtalmologiques 143 - Cahier 1 (2007), 7 pages ; <https://www.gatinel.com/wp-content/uploads/2010/01/Optique-adaptative.pdf> ; Bertrand Charlet, Abdesselem Elhassouni, Vincent Hardy, *Comprendre l'optique adaptative*, Photoniques 92 (2018), 42-44, <https://www.photoniques.com/articles/photon/pdf/2018/04/photon201892p42.pdf> ; Natacha Stolowy, Frédéric Matonti, *Imagerie en optique adaptative*, Les Cahiers d'Ophtalmologie, 216 (2018), 52-55, <https://www.cahiers-ophtalmologie.fr/media/6ef4179fc60daac6efde2f941b6ce51d.pdf>

18. Vanessa Rosso, Rémy Béland, Yvon Renotte, Serge Habraken, Yves Lion and Paul Charrette, *Coupled Tomographic and Strain Measurements Using Photorefractive Holography and Shearography*, Optics Letters, 33 (8) (2008), 797-799, <http://hdl.handle.net/2268/3875> ; Vanessa Rosso, Rémy Béland, Sylvain Lecler, Yvon Renotte, Serge Habraken, Yves Lion and Paul Charrette, *Simultaneous strain and tomographic imaging with coupled photorefractive holography and shearography through turbid media*, J. Biomed. Opt. (2008), 13 (4), paper # 044010 – 7 pages, <http://hdl.handle.net/2268/262714>

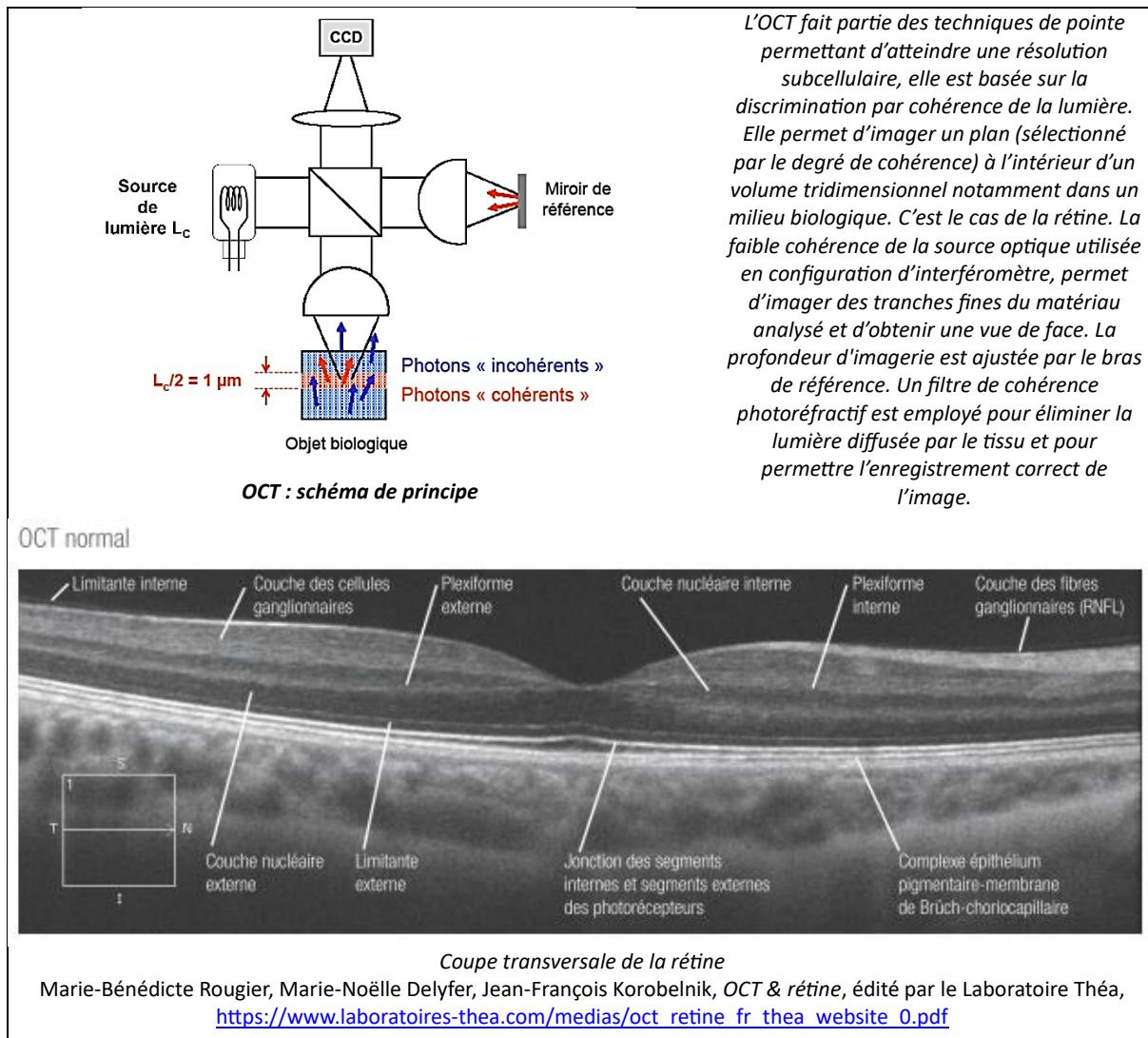
au lieu des rayons X, ce qui le rend sans danger et sans irradiation. L'OCT utilise les propriétés de réflexion de la lumière sur les tissus rétiniens. Un faisceau de lumière infrarouge est projeté sur l'œil et les échos lumineux réfléchis par les différentes couches de la rétine sont mesurés. Grâce à la technologie d'interférométrie, l'appareil analyse ces échos pour reconstruire une image détaillée en 2D ou 3D des structures internes de l'œil. Cela permet de visualiser les différentes couches de la rétine, leur épaisseur avec une précision micrométrique, et leur intégrité, ainsi que la tête du nerf optique ¹⁹ [voir encadré p.11].



Adaptive Optics OCT (AO-OCT) : l'association de l'optique adaptative (OA) avec la tomographie par cohérence optique (OCT), représente une avancée majeure dans l'imagerie rétinienne. Elle combine les forces des deux technologies pour fournir des images de la rétine d'une résolution et d'une clarté inégalées, permettant une visualisation quasi-histologique des structures oculaires *in vivo*. C'est une technologie très avancée et encore largement de recherche. L'optique adaptative permet de corriger les aberrations optiques de l'œil, ce qui résulte en des images d'une résolution encore plus élevée, permettant de visualiser des cellules individuelles, y compris les cônes. Avec l'AO-OCT, on peut disposer d'une imagerie 3D haute résolution avec une résolution cellulaire : les cônes peuvent être identifiés et

19. David Huang, Eric A. Swanson, Charles P. Lin, Joel S. Schuman, G. Stinson, Warren Chang, Michael R. Hee, Thomas Flotte, Kenton Gregory, Carmen A. Puliafito, James G. Fujimoto, *Optical Coherence Tomography*, *Science*, 254 (1991), 1178-1181, <https://www.researchgate.net/publication/232175518> ; Simone Tzardis, Martin Friedlander, *Optical coherence tomography: when a picture is worth a million words*, *J. Clin. Invest.*, 133 (19) (2023), 4 pages, <https://doi.org/10.1172/JCI174951> ; *Tomographie en cohérence optique*, https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Sp%C3%A9cial:DownloadAsPdf&page=Tomographie_en_coh%C3%A9rence_optique&action=show-download-screen

comptés, et leur espace peut être mesuré. Cependant, même avec l'AO-OCT, la différenciation des types de cônes (L, M, S) en fonction de leur sensibilité spectrale reste un défi, car elle ne mesure pas directement cette propriété. Des techniques sont à l'étude. En présentant des stimuli lumineux de longueurs d'onde spécifiques et en observant la réponse individuelle des cônes (par exemple, des changements dans leur réflectivité ou la dilatation de leurs vaisseaux sanguins associés), il est possible de déduire leur type. Par exemple, un cône qui répond fortement à la lumière rouge mais peu à la verte serait un cône L. C'est une technique complexe mais très puissante.



- Suivi des mouvements oculaires en temps réel

L'œil bouge en permanence. Le prototype utilise un balayage infrarouge (940 nm) à 60 images/seconde pour observer en continu les mouvements microscopiques de l'œil. Sur base des informations fournies par le balayage, un système de suivi et compensation du tremblement oculaire fabriqué « sur mesure » opère à 960 Hz, avec latence de 4 ms. Cela permet de maintenir un ciblage précis, malgré les microdéplacements naturels de l'œil. Le contrôleur réajuste la position du faisceau pour que chaque microdose LASER retombe toujours sur la même cellule photoréceptrice.

- Stimulation ciblée des cônes M

Une fois les cônes M identifiés, le système utilise un LASER de 543 nm (vert) pour les stimuler spécifiquement. À l'aide de l'AOSLO (Adaptive Optics Scanning Light Ophthalmoscopy), des « microdoses de lumière » sont dirigées à raison de 10^5 impulsions par seconde précisément sur les cônes M, en évitant les cônes L et S grâce à la carte spectrale préétablie. Les intensités lumineuses sont

modulées individuellement pour chaque cône M par **AOM** (*Acousto-Optics Modulators*²⁰, fonctionne jusqu'à 50 MHz) de manière à générer une activation contrôlée et précise, en temps réel, de chaque microdose adaptée au cône ciblé et à la perception visuelle recherchée.

Deux LASERs sont utilisés dans le système Oz, l'un à 543 nm, l'autre à 488 nm, qui ont des rôles distincts en fonction de leurs propriétés spectrales et de l'effet recherché sur les cônes rétiniens.

Celui à 543 nm sert à la stimulation ciblée des cônes L et M, particulièrement les M pour générer la couleur « *olo* », et produire une couleur « hors du gamut naturel humain ». En dehors d'Oz, ce LASER est perçu comme « vert ».

Le LASER à 488 nm produit une stimulation plus large puisqu'il peut activer les trois types de cônes. Il est utilisé pour des expériences de comparaison ou de contrôle, notamment pour tester la capacité du système en explorant un espace colorimétrique plus large, mais ne permet pas d'isoler les cônes M aussi précisément que celui à 543 nm.

En résumé, le LASER à 543 nm est un « scalpel », précis et sélectif, tandis que celui à 488 nm est un « pinceau large » utile pour tester des mélanges plus globaux. Ils interagissent avec les tests de « color matching » et peuvent modifier la saturation perçue de « *olo* » [cf. ci-après].

- Résultat perceptuel

La stimulation exclusive des cônes M génère une perception de couleur inédite, « au-delà du spectre naturel, du gamut humain », baptisée « *olo* », une sorte de bleu-vert d'une saturation jamais vue. *Quand la stimulation est perturbée*, par exemple en « jittant » le point de stimulation pour qu'il touche un cône voisin, différent, la couleur perçue s'effondre et « revient au vert naturel du LASER », prouvant la précision du ciblage.

Outils utilisés / mis à la disposition des patients pour le contrôle perceptuel et la validation du résultat :

- différents systèmes de mesure des couleurs : projecteur RGB et LASER quasi-monochromatique accordable, et blanc du projecteur,
- expériences de « color matching » (appariement des couleurs) : les sujets sous traitement sont invités à « égaler visuellement » (égalité de la teinte perçue lors des expositions aux microdoses, en l'occurrence « *olo* », à une cible « témoin » dont ils peuvent moduler la couleur (teinte et intensité) en utilisant les sources mises à disposition pour « approcher » au mieux la couleur à identifier,
- contrôle avec « jittering » (décalage des impulsions) pour tester la précision.

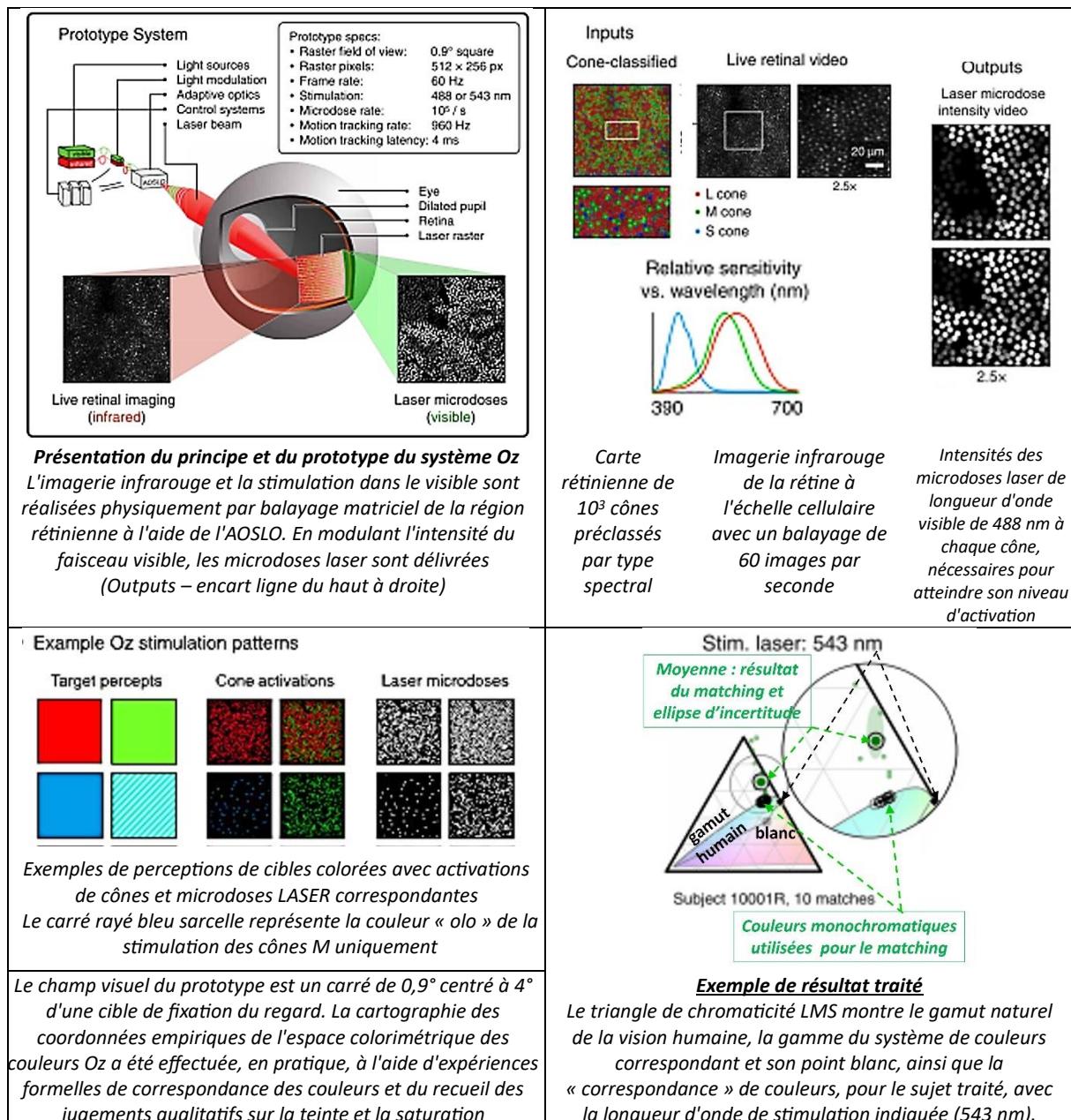
Des logiciels spécifiques, permettent à la fois de gérer précisément la succession des opérations complexes à effectuer, de collecter et d'interpréter les résultats auprès des cinq « cobayes ».

Un exemple de résultat est proposé dans la figure illustrant le *process Oz*. Dans le souci de ne pas « rebuter à priori » le(a) lecteur(trice) peu ou pas spécialisé(e), l'ensemble des opérations y amenant, « relativement complexe », n'est pas proposé ici. Le(a) lecteur(trice) intéressé(e) trouvera le traitement détaillé des résultats dans l'article [voir encadré p.13].

La figure proposée confirme sans équivoque que la couleur « *olo* » se situe au-delà du gamut naturel des couleurs humaines. Lors des comparaisons avec des cibles modulables en intensité et chromatiquement, les cinq sujets ont jugé nécessaire de désaturer (assez fortement) l'*olo* avec le blanc du projecteur afin de le faire correspondre au mieux à des couleurs (quasi) monochromes affichées, produites par les LASERs accordables, qui se situent à la limite du gamut naturel humain. Les longueurs d'onde monochromatiques correspondantes, 501 à 512 nm, sont les teintes bleu sarcelle (turquoises) les plus saturées pour une vision normale des couleurs dans les conditions d'observation des sujets testés.

La dénomination qualitative des teintes et les notes de saturation des sujets corroborent ces résultats quantitatifs, bien que l'*effet Abney* [un décalage de teinte avec la saturation] ouvre la possibilité que la teinte de la longueur d'onde la plus proche puisse ne pas représenter exactement la teinte de la couleur « *olo* » non diluée. Les noms de couleurs proposés pour « *olo* » incluent « bleu sarcelle », « vert », « bleu-verdâtre » et « vert légèrement bleuté ».

20. https://fr.wikipedia.org/wiki/Modulateur_acousto-optique



- Épilogue

La couleur « olo » n'a pas de longueur d'onde propre, tel le « rouge » ou le « bleu ». Elle ne correspond à aucune longueur d'onde unique dans le spectre lumineux traditionnel. Elle est perçue comme un « bleu-vert (bleu sarcelle) extrêmement saturé », plus intense que tout ce qu'un écran ou pigment peut reproduire. Elle est le fruit d'une stimulation (quasi-) *exclusive des cônes M* de la rétine humaine, ceux sensibles aux longueurs d'onde moyennes, généralement associées au vert. En temps normal, toute lumière qui active les cônes M active aussi des cônes L (rouge) et/ou S (bleu), car leurs spectres se chevauchent. Grâce à une technologie LASER ultra-précise associée à la plate-forme Oz (décrise supra), des chercheurs ont réussi à cibler uniquement / principalement les cônes M, créant ainsi une **perception visuelle inédite**. En effet, bien que générée expérimentalement avec un LASER vert à 543 nm, ce n'est pas cette longueur d'onde qui définit « olo » mais la manière dont elle est adressée uniquement à des cônes M.

En résumé, « **olo** » est une couleur métamérique spatiale, née d'un « piratage » de la rétine et non d'une onde lumineuse naturelle. **Elle reste invisible sans aide technologique et est « plus saturée que**

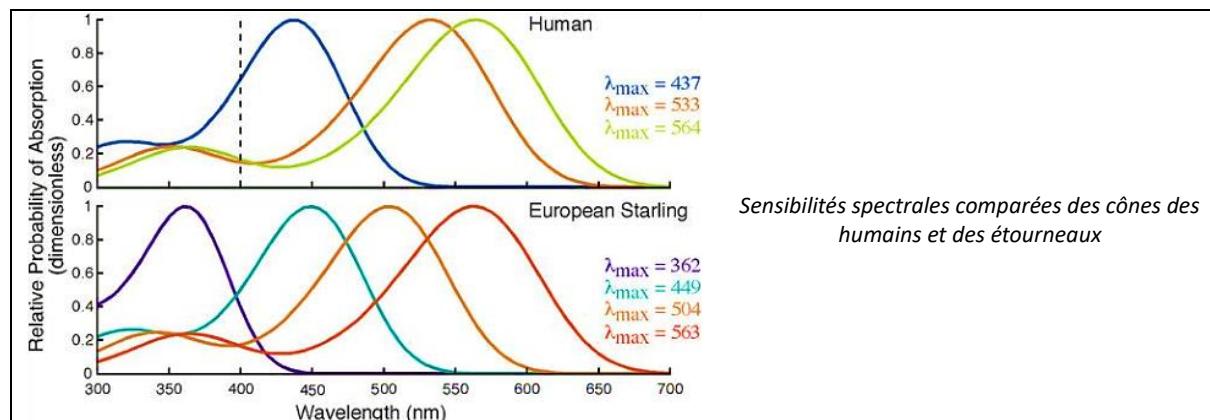
n'importe quelle couleur visible dans le monde réel » selon le Pr Ren Ng de l'Université de Californie, co-auteur de l'étude « olo ».



Échantillon de teinte fourni par le Pr Ng (un des patients)

Implications, perspectives et applications potentielles

Ce procédé pourrait ouvrir de nouvelles voies pour les sciences de la vision et les neurosciences auxquelles il offre une nouvelle plate-forme expérimentale. Il permettrait d'explorer la plasticité cérébrale du système visuel humain comme l'exploration de nouvelles dimensions de la vision des couleurs, d'en améliorer la compréhension et d'être utilisé pour restaurer une perception des couleurs chez les daltoniens ou même pour créer une « vision tétrachromatique » (ajout d'un quatrième type de cône comme chez la plupart des oiseaux) ²¹.



Ce principe pourrait également révolutionner les écrans et les affichages visuels en permettant le développement de nouvelles technologies d'affichage ultra-réalistes ²².

Au risque de me répéter, on peut affirmer que *l'étude explore une nouvelle frontière dans le domaine des sciences de la vision. Elle marque un énorme « tournant et surtout pas en avant » en démontrant que l'on peut élargir notre expérience de la perception des couleurs et que celle-ci peut être manipulée à un niveau cellulaire, avec des applications prometteuses pour la science et la technologie.*

L'évolution du principe Oz ouvre des perspectives époustouflantes mais aussi des défis techniques vertigineux. Voici ce à quoi on pourrait s'attendre :

- *Extension du champ visuel* : le prototype actuel ne couvre qu'un carré de 0,9° sur la rétine, ce qui correspond à une très petite portion du champ visuel.
- *Miniaturisé et intégré* à des dispositifs portables (lunettes, casques), Oz pourrait être utilisé pour :
 - *Créer des images ou vidéos en couleurs inédites*, voire personnalisées selon la rétine de chaque individu.
 - *Améliorer la réalité virtuelle ou augmentée* en ajoutant des dimensions de couleur jusqu'ici inaccessibles.
- Nous avons déjà évoqué les *potentielles applications médicales et neuroscientifiques* : Oz pourrait devenir un outil pour :
 - *Explorer la plasticité du cerveau* en simulant des visions impossibles, comme celles de tétrachromates.
 - *Aider les personnes daltoniennes* en contournant certaines limitations liées à la répartition des cônes.

Bien sûr, tout cela n'est pas pour demain :

21. Tétrachromatisme, <https://fr.wikipedia.org/wiki/T%C3%A9trachromatisme>

22. Konrad Wolfenstein, Réalité étendue – La découverte de « olo » : une nouvelle couleur et son potentiel de réalité virtuelle, Xpert.digital, XPaper, 21 avril 2025, <https://xpert.digital/fr/olo-une-nouvelle-couleur/>; Hafsa Khalil, Scientists claim to have discovered 'new colour' no one has seen before, BBC News (19 April 2025), <https://www.bbc.com/news/articles/clyq0n3em41o>

- Il faudra améliorer la précision spatiale et temporelle pour suivre l'œil librement sans fixation imposée.
 - Gérer la fuite lumineuse (actuellement à 67 %) pour cibler chaque cône avec plus de pureté.
- En bref, Oz est encore au stade de la démonstration expérimentale mais propose une vision littéralement inédite : créer des couleurs qui n'existent pas dans la nature.

Commentaires et critiques

Il est évident qu'un tel sujet ne pouvait pas rester sans critique(s) . . . et elles n'ont pas tardé ! La découverte suscite déjà des débats au sein de la communauté scientifique concernée. Certains experts, dont le *Pr John Barbur* de l'Université St George de Londres²³, estiment que « **l'existence d'une nouvelle couleur est ouverte à la discussion** ». Il souligne que la stimulation sélective des cellules rétiniennes est un « **exploit technologique** » mais que la perception d'une nouvelle couleur pourrait être une question d'interprétation. Il considère que cette nouvelle nuance ne serait en réalité qu'une intensification d'une couleur déjà connue. « *Si les cellules coniques rouges sont stimulées en grand nombre, on perçoit un rouge profond* », explique-t-il à titre de comparaison, suggérant que **des variations similaires pourraient expliquer la perception de « olo »**.

Et il n'est pas le seul. Les principales critiques peuvent être résumées de la manière suivante :

- *Échantillon restreint et biais potentiel* : seuls cinq sujets ont participé aux tests, dont trois sont co-auteurs, ce qui ouvre la porte à un effet de désirabilité et à un manque de généralisation. C'est une limite réelle d'une preuve de principe. Dans les études pionnières en AO-OCT/AOSLO, on travaille régulièrement avec des échantillonnages plus importants pour vérifier la faisabilité technique. Le fait que certains sujets soient auteurs augmente certes le risque de biais, mais les conditions de « jitter » jouxtées dans chaque session et l'aveugle partiel sur le type de stimulation réduisent notablement ce risque.
- *Zone rétinienne et champs visuels très limités* : l'expérimentation se limite à une zone de 0,9° carrés à 4° d'excentricité, donc hors de la fovea et en vision fixe. On ne sait pas si l'approche fonctionne dans le regard naturel ni au centre du champ visuel. Les auteurs reconnaissent eux-mêmes cette limitation et l'exposent en discussion comme un défi à relever pour une version « grand format » d'Oz. Il s'agit moins d'une critique qui invalide le principe que d'un chantier de mise à l'échelle.
- *Fuite lumineuse importante* : le modèle de fuite (~ 67 % de la lumière diffusée vers les voisins) suggère que l'activation M n'est pas « pure », et que la couleur « olo » pourrait résulter d'un mélange imparfait plutôt que d'une stimulation isolée. Le cas n'est effectivement pas idéal mais le modèle montre que même avec 2/3 de fuite, la chromaticité générée sort du gamut naturel. La critique pointe bien un défi à améliorer mais sans invalider la démonstration de l'expansion du gamut.
- *Effet d'adaptation* : le besoin d'un balayage ultra-rapide (10^5 micro-impulsions / s) pour éviter la disparition du percept fait craindre que l'expérience soit un artefact d'adaptation plutôt qu'une nouvelle qualité colorée stable. Les auteurs ont justement comparé stimulation statique vs dynamique : la version statique s'évanouit, la dynamique persiste, démontrant que la couleur « olo » n'est pas un simple « after-image » ou artefact d'adaptation.
- *Subjectivité des jugements colorimétriques* : les mélanges de couleur reposent sur des jugements humains (dénomination, échelles de saturation), qui peuvent varier selon l'expérience du sujet ou la fatigue. Toutefois, l'utilisation de deux systèmes de « matching » (projecteur RGB et laser monochromatique + blanc), de 222 essais et la mesure de la nécessité d'ajout de blanc (« negative matching ») assurent une robustesse quantitative. Les jugements qualitatifs sont bien encadrés par des mesures objectives.
- *Validité de la « nouvelle couleur »* : philosophiquement, on peut arguer que « olo » est simplement un point extrême du triangle chromatique ou un artefact de perception périphérique, non une couleur vraiment inédite. Mais dans le cadre de la théorie trichromatique, un point hors du gamut qui requiert d'ajouter de la lumière blanche pour le faire correspondre à un « monodispersé », constitue par définition une couleur hors-gamme. « Olo » répond rigoureusement à cette définition de nouveauté perceptuelle.

23. John Barbur, <https://www.citystgeorges.ac.uk/about/people/academics/john-barbur> ;
<https://www.vision-research.eu/index.php?id=213>

- *Absence de réPLICATION indépendante* : aucun autre laboratoire n'a encore reproduit les résultats, ce qui limite la validation externe . . . mais est une situation normale pour une étude de ce type. Il ne s'agit donc pas à proprement parler d'une critique. Il serait important que d'autres centres équipés d'AOSLO/AO-OCT relèvent le défi !

En résumé. Considérant le « *jeu des questions – réponses* » ci-dessus et jusqu'à plus ample informé, on peut raisonnablement considérer que bien que pertinentes, la plupart des critiques précédentes relèvent davantage de *limitations légitimes* d'un prototype ultra-pointu que de *défauts méthodologiques majeurs* invalidant la conclusion : *on peut effectivement, par stimulation cellulaire ciblée, générer un percept coloré au-delà du gamut humain naturel*. Les critiques techniques (fuite, champ réduit) sont justifiées mais pointent plutôt « la feuille de route » pour « amélioration / généralisation » du dispositif Oz, *elles n'invalident toutefois pas la preuve du concept*.

On notera qu'à ce jour, ***aucune revue scientifique à comité de lecture n'a encore publié de réponse formelle signée sous la forme d'un article traditionnel***. La plupart des critiques circulent sous forme de rapports d'expertise anonymes ou de commentaires informels sur des plateformes de post-publication.

Conclusion

Après lecture de l'article et particulièrement le résultat surprenant énoncé par les auteurs, je pense que des investigations complémentaires devraient être menées pour apporter la « preuve certaine du concept », de l'existence de cette « couleur jamais vue ». Les auteurs ont travaillé de manière prudente et systématique mais des interrogations subsistent et certains aspects devraient être approfondis. Les auteurs y font d'ailleurs allusion dans leurs commentaires. À mon avis, « l'approfondissement » de quelques points permettraient de renforcer la crédibilité des résultats proposés, au demeurant fort intéressants mais aussi extrêmement interpellants.

Ces derniers ont été obtenus avec cinq « échantillons » qui ont certainement été sélectionnés de manière rigoureuse, selon un protocole sérieux, mais me paraissent insuffisamment nombreux. Ils devraient être multipliés, sans doute considérablement pour devenir « définitivement » crédibles.

La sélection des cônes M éclairés par les impulsions LASER nécessite un pré-traitement de la rétine par un éclairage infra-rouge proche : a-t-on vérifié, est-on certain qu'il n'influence pas le comportement ultérieur de la rétine, donc la réponse qu'elle fournit in fine ? La même question peut être posée à propos de l'OCT appliquée.

Ne serait-il pas intéressant d'effectuer l'analyse comportementale colorimétrique en appliquant un traitement analogue aux cônes L et S, avec des éclairages LASER appropriés, et comparer les résultats ? De même, on pourrait éclairer chaque type de cônes par des éclairages monochromatiques extérieurs à leurs domaines de sensibilité et confronter les résultats aux précédents.

Sans être limitative, les réponses aux questions précédentes permettraient probablement de déjà fournir des informations intéressantes permettant d'avancer vers la confirmation, ou non, de ce que l'article annonce, *l'observation de « couleurs que l'on n'a jamais vues »*.

En « deux mots » : *le concept abordé est intéressant, fort intéressant, mais sans doute encore insuffisamment documenté. J'ai le sentiment que les auteurs ont certainement « fait quelque chose d'exceptionnel » mais n'ont vraisemblablement levé qu'un « petit coin du voile » . . . et engendré une multitude de questions, auxquelles il faudra tenter de répondre, . . . donc qu'enormément de « choses surprenantes » restent à découvrir en la matière . . . !*

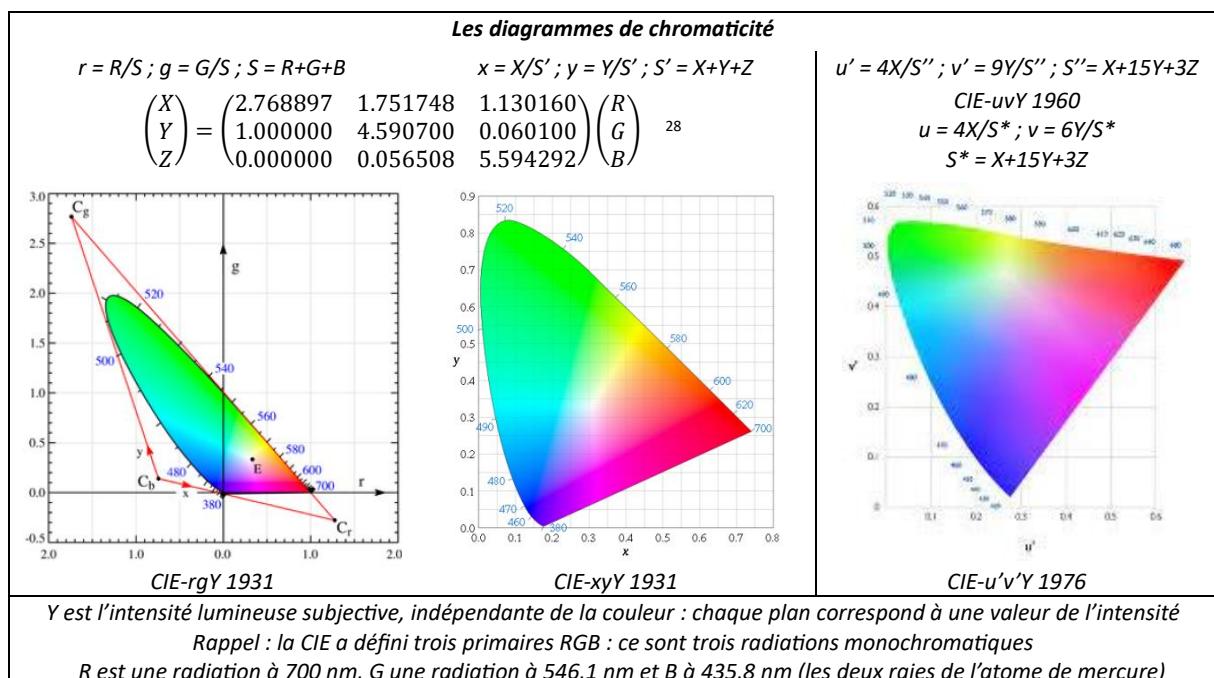
Annexes

- Le facteur de luminance L^* ²⁴

L'une des trois variables colorimétriques (celle d'intensité) qui caractérisent la couleur d'un objet réfléchissant ou transmetteur, pour des conditions données d'éclairage et d'observation ; c'est le rapport de la luminance de l'objet à la luminance d'un diffuseur parfait recevant le même éclairage. Ce rapport est égal au facteur de réflexion (ou de transmission) lorsque l'objet diffuse la lumière selon la loi de Lambert. Il se mesure en pour cent.

- Les espaces chromatiques uniformes²⁵

L'un des principaux intérêts d'une représentation graphique de l'ensemble des couleurs est de pouvoir quantifier la différence entre deux couleurs. Pour que ce type de quantification soit représentatif d'une « différence visuelle », il est nécessaire que l'espace chromatique considéré soit homogène, c'est-à-dire que la valeur de l'écart chromatique soit proportionnelle à la capacité de l'œil humain de différencier les deux couleurs. Dans les années 1940, D.L. MacAdam effectua de nombreuses observations afin d'établir la relation entre la distinction visuelle et l'écart chromatique. À partir d'une couleur donnée, il porte dans le diagramme de chromaticité les couleurs voisines que l'œil d'un observateur moyen parvient à distinguer et démontre ainsi que le système CIE-xyY 1931 est loin d'être homogène²⁶. L'ensemble des couleurs voisines décrit des ellipses dont la taille et l'orientation dépendent de leur position dans le diagramme de chromaticité²⁷.



McAdam a donc recherché une transformation analytique permettant d'uniformiser les distances entre couleurs « juste perceptibles »²⁹. En 1960, la CIE recommande une première transformation qui remplace x et y par u et v. En 1976, elle propose une version u' et v' qui sont des combinaisons légèrement modifiées de X, Y et Z. Dans ce diagramme, les ellipses sont quasiment circulaires et de

24. <https://vitrinelinguistique.qlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/17086263/facteur-de-luminance>

25. Alain Tréneau, *Eléments de base de la colorimétrie*, Laboratoire LIGIV – Université Jean Monnet, Saint-Etienne (2014), 14 pages, [Elements-de-base-de-la-colorimetrie.pdf](#)

26. David L. MacAdam, *Projective transformations of colour-mixture diagrams*, J. Opt. Soc. Am., 32, (1942), 2 ; *Uniform color scales*, J. Opt. Soc. Am. 64 (1974), 691

27. https://fr.wikipedia.org/wiki/Ellipse_de_MacAdam

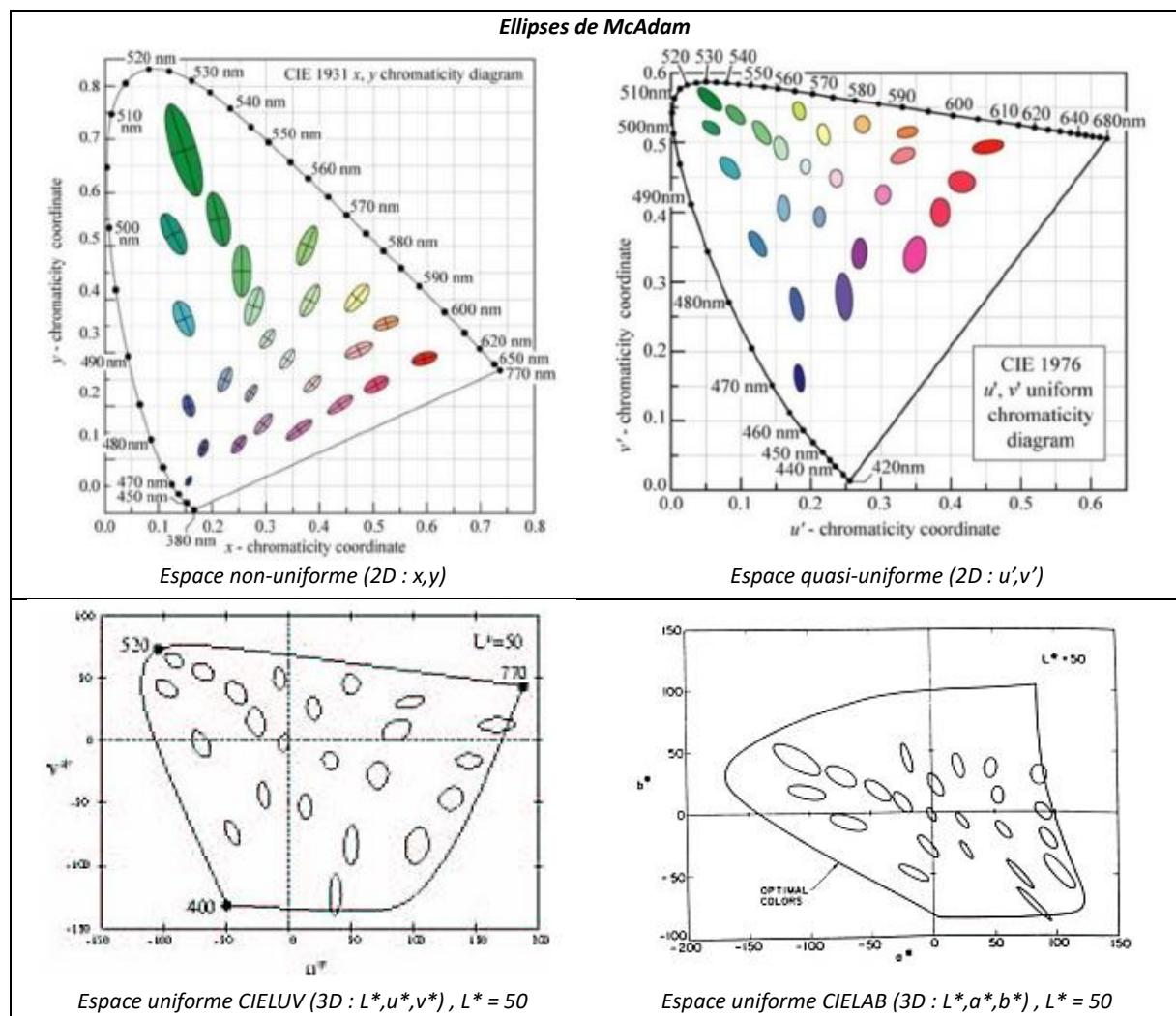
28. Janos Schanda, *Colorimetry, Understanding the CIE System*, CIE – Wiley-Interscience Inc. Publication (2007)

29. David L. MacAdam, *Color measurement and tolerances*. Official Digest (1965), 1487–1531 ; *Color Measurement, theme and variation*, Optical Sciences. Springer-Verlag, second revised ed., (1985)

tailles similaires. L'ajout de la luminance, ou plus exactement du *facteur de luminance* correspondant à la clarté d'une couleur, au diagramme de chromaticité u', v' permet de définir *l'espace colorimétrique uniforme CIE 1976 $L^*u^*v^*$* (communément appelé **CIELUV 1976**) dont les paramètres L^* , u^* et v^* sont des fonctions de Y , u' et v' . Ce système est donc issu de l'ancien *CIE-XYZ 1931*. Notons que l'on est passé chronologiquement d'un système 3D (Maxwell - RGB) à un système 2D (CIE 1931 - x, y) et revenu à une représentation 3D (CIE 1976 et suivants).

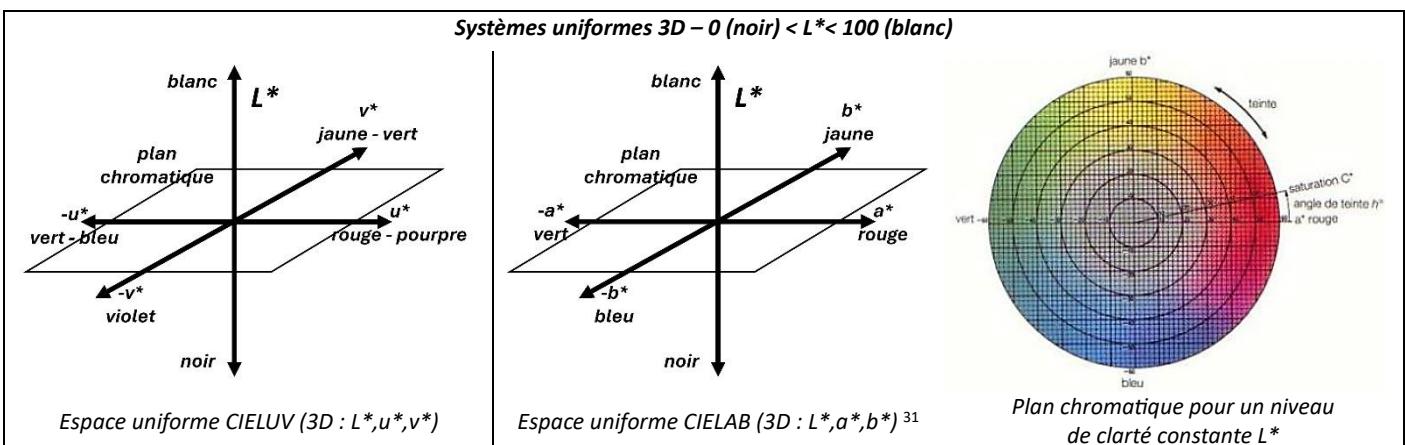
En même temps, la CIE recommande également un autre espace colorimétrique uniforme issu d'autres recherches que celles de McAdam : l'espace **CIELAB 1976**. Il est principalement utilisé dans les milieux industriels. Comme le précédent, il associe le paramètre clarté L^* (identique à celui de CIELUV) à deux paramètres de chrominance a^* et b^* construits à partir des coefficients X , Y et Z selon une logique différente résultant des travaux de Adams et Nickerson³⁰.

Les deux espaces tendent vers le même objectif : l'uniformisation des sensations colorées dans le diagramme de chromaticité.



Le calcul des paramètres caractéristiques des systèmes CIELUV et CIELAB nécessiterait des développements qui sortent du cadre de cette présentation. N'intéressant probablement que les spécialistes, ils ne sont pas proposés ici. Le(a) lecteur(trice) intéressé(e) les trouveront dans plusieurs des références relatives au sujet ^{8,14,16,25,...}

30. Elliot Q. Adams, *A theory of color vision*, Psycho. Rev., 30 (1923), 56 ; X-Z planes in the 1931 I.C.I. system of colorimetry, J. Opt. Soc. Am., 32 (1942), 168 ; Dorothy Nickerson, *The specification of color tolerance*, Textile Res. 6 (1936), 509 ; Munsell rennotations used to study color space of Hunter and Adams, J. Opt. Soc. Am., 40 (1950), 85 ; Uniform color scales : Munsell conversion of OSA-Committee selection, J. Opt. Soc. Am., 65 (1975), 205



- Conversion RGB – XYZ – LMS

Rappelons qu'une couleur est caractérisée par trois attributs perceptifs visuels :

- la *teinte* (hue) associée à la couleur rouge, vert, bleu, . . . Elle correspond à ce que l'on appelle « couleur » en langage courant, c'est une composante de la perception visuelle qui permet de distinguer les radiations lumineuses par leurs différences spectrales. La couleur au sens large, inclut la sensation subjective de luminosité ou de clarté.
- la *saturation* (chroma) associée à l'aspect délavé ou non de la couleur. Elle mesure la « distance » depuis une teinte achromatique (blanc, gris ou noir). Les teintes saturées sont celle du spectre visible, elles peuvent être représentées par une longueur d'onde.
- la *luminosité* (value) associée à l'aspect sombre ou clair de la couleur. Elle mesure la « distance » depuis le noir (absence de lumière).

les deux premiers sont les paramètres chromatiques, le troisième est photométrique.

En général, on peut exprimer les composantes LMS en fonction des composantes RVB via une matrice de transformation appropriées. Toutefois, la matrice de passage d'un système à l'autre n'est pas une transformation standard comme la rotation ou la mise à l'échelle. Elle implique une transformation des coordonnées colorimétriques mais sa forme exacte dépend de la fonction de transformation spécifique utilisée.

Les deux systèmes sont « fondamentalement » différents puisqu'ils reposent sur des process « expérimentalement » différents, on pourrait presque dire « opposés ». L'un consiste à mélanger trois teintes fondamentales en quantités ad hoc pour reproduire l'analogie avec une couleur étudiée. C'est le principe du « *color matching* ». R, G et B « représentent » les quantités de chacune des trois composantes nécessaires à l'égalisation précédente. L'autre exprime la contribution de chacun des types de cônes L, M et S à la perception d'une couleur observée. Contrairement à RGB où chaque contribution est monochromatique, chaque type de cône a un maximum et une largeur de réception, et les spectres d'absorption se superposent. En outre, rappelons-nous que RGB fait intervenir des composantes négatives.

La transformation nécessite le passage par un espace intermédiaire. On utilise souvent l'espace XYZ. La fonction de transformation de RGB vers XYZ est connue, reste à définir celle de XYZ vers LMS. La matrice composite RGB vers LMS est obtenue en multipliant les matrices de transformation. L'étape critique est le passage de XYZ à LMS qui n'est pas simple parce que dépendant de divers paramètres tels la définition précise du blanc, l'éclairement / luminosité du plan considéré, le gamut de référence, le diamètre angulaire du champ d'observation, . . . d'où la nécessité d'utiliser des transformations non

31. https://fujitaratko.sakura.ne.jp/infosci/lab_e.html ; <https://www.datacolor.com/fr/business-solutions/blog/quest-ce-que-cielab/> ;
https://www.researchgate.net/publication/266462481_Understanding_Color_Models_A_Review/figures?lo=1

linéaires qui entraînent des approximations ou l'utilisation de fonctions plus complexes. Notons que le diagramme x, y du système colorimétrique XYZ représente la chromaticité des couleurs sans faire référence à leur luminosité (luminance / éclairement). Il se situe dans un plan à luminosité constante. Le diagramme de chromaticité l, s doit également être isoluminant, par exemple celui proposé par *MacLeod et Boynton*³².

Pratiquement, la matrice de transformation doit être définie pour que les valeurs LMS représentent (au mieux) la réponse des cônes humains aux différentes longueurs d'onde. De nombreuses normes ont été élaborées en fonction de leurs applications (impression, écran, dessin, réseau, . . .). La CIE a publié des tables disponibles sur son site³³.

Une approximation largement utilisée est celle de *Hunt-Pointer-Estevez* aussi appelée matrice de *von Kries*^{12, 34}:

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.38971 & 0.68898 & -0.07868 \\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641 \\ 0.00000 & 0.00000 & 1.00000 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

mais elle n'est pas universelle. D'autres « formes » de la matrice ont été développées en fonction de conditions particulières d'utilisation. À titre exemplatif, juste pour information, tenant compte du fait que le modèle LMS doit reposer sur des fondements physiologiques soigneusement établis, *Viénot et Le Rohellec* préconisent d'utiliser la matrice de passage définie par *Smith et Pokorny*³⁵ dans laquelle la somme des composantes (L + M) donne directement la luminance Y, tenant compte du fait que les cônes S jouent un rôle « très » minoritaire¹³.

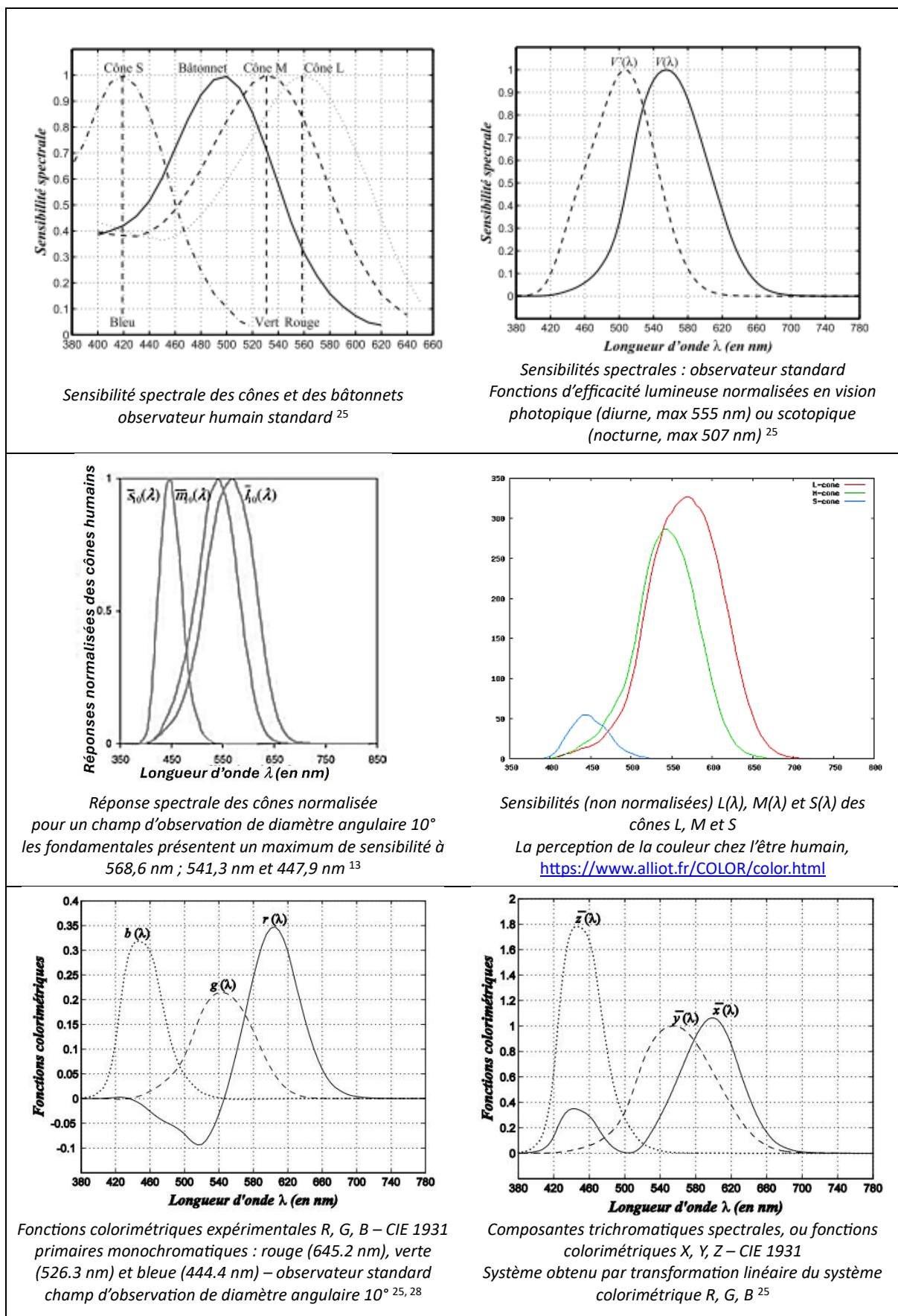
$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.15514 & 0.54312 & -0.03286 \\ -0.15514 & 0.45684 & 0.03286 \\ 0.00000 & 0.00000 & 0.01608 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Un ensemble de fonctions LMS basées sur la physiologie a aussi été proposé par *Stockman et Sharpe* en 2000³⁶. Elles ont été publiées dans des rapports techniques de la CIE en 2006 (CIE 170). Elles peuvent être transformées en un ensemble de trois fonctions de correspondance des couleurs similaires aux fonctions CIE 1931.

- LMS vs RGB et XYZ

Le système LMS étant (plus) rarement utilisé dans la pratique courante, il tendance à être assez souvent confondu avec le RGB par « l'utilisateur moyen ». Nous proposons donc leurs principales caractéristiques dans un tableau comparatif / récapitulatif ci-après.

-
32. Donald I. A. MacLeod and Robert M. Boynton, *Chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal luminance*, J. Opt. Soc. Am. 69 (1979), 1183-1186 ; <https://opg.optica.org/josa/abstract.cfm?URI=josa-69-8-1183>
33. Charles A. Wüthrich, *Fundamentals of Imaging Colour Spaces*, Bauhaus-Universität Weimar (D), https://www.uni-weimar.de/fleadmin/user/fak/medien/professuren/Computer_Graphics/3-ima-color-spaces17.pdf ; <https://lightcolourvision.org/dictionary/definition/lms-colour-space/> ; Rüdiger Paschotta, *Color Spaces*, RP Photonics Encyclopedia, https://www.rp-photonics.com/color_spaces.html ; *Cone fundamentals & the LMS color space*, (2021), <https://www.strollswithmydog.com/cone-fundamental-lms-color-space/> ; *Colorimétrie : De XYZ à LMS, vers plus de personnalisation*, La Revue Francophone de l'Éclairage (2020), <https://lux-revue-eclairage.fr/colorimetrie-de-xyz-a-lms-vers-plus-de-personnalisation%EF%BF%BC/>
34. Johannes von Kries, https://en.wikipedia.org/wiki/Von_Kries_coefficient_law ; R.W.G. Hunt and M.R. Pointer, *A colour-appearance transform for the CIE 1931 standard colorimetric observer*, Color Research and Application, 10 (3) (1985), 165-179, <https://doi.org/10.1002/col.5080100306>
35. Vivianne C. Smith and Joel Pokorny, *Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm*, Vision Research, 15 (2) (1975), 161-171
36. Andrew Stockman and Lindsay T. Sharpe, *The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype*, Vision Research, 40 (13) (2000), 1711-1737, [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(00\)00021-3](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(00)00021-3) ; CIE 170-1 (2006), *Fundamental chromaticity diagram with physiological axes - Part 1*, <https://cie.co.at/publications/fundamental-chromaticity-diagram-physiological-axes-part-1> ; Judah B. De Paula, *Converting RGB Images to LMS Cone Activations*, TR-06-49 (October 2006), <https://www.cs.utexas.edu/~ai-lab/pubs/tr06-49.pdf>



Pour finir . . .

. . . sur « un mode plus léger »

En terminant cette note, ne serait-il pas raisonnable de préciser / reformuler tout ou partie des questionnements posés en préambule, compte tenu des informations collectées ?

Le cerveau aurait-il un autre « *mode de production de la sensation de couleur* » lorsqu'on stimule un seul type de cônes avec une radiation monochromatique lui correspondant (par exemple les cônes M avec une lumière verte) plutôt que les divers types de cônes en même temps, avec la même radiation (éclairage normal de la rétine par la lumière verte) ? Considérant l'expérience proposée, il semble que ce serait le cas. Il faudrait alors l'explorer en multipliant les expériences du genre.

Allons-nous trouver ? / créer ? un/des système(s) de couleurs inconnu(s) aujourd'hui ?

Existerait-il un/des espace(s) colorimétrique(s) inexploré(s) ?

Ne fleurte-t-on pas avec la limite entre science et science-fiction ?



Somewhere over the rainbow

Way up high

There's a land that I heard of

Once in a lullaby

...

And the dreams that you dare to dream

Really do come true

...

Over the Rainbow – musique du film « *Le magicien d'Oz* » (1939)

interprétée par *Judy Garland*

composée par *Harold Arlen*, paroles de *Yip Harburg*