

Perception des couleurs

Sujet Master 2 Science-Cognitive 2026-2027

Psychophysique et modèles mathématiques

Encadrants : David Alleysson et David Méary, Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition

Contacts : David.Alleysson(@)univ-grenoble-alpes.fr

La vision des couleurs est le mécanisme cérébral par lequel les neurones du système visuel donnent aux humains la sensation colorée à partir de la lumière qui entre dans l'œil. De nombreuses études d'anatomie et de physiologie du système visuel ainsi que de psychophysique et psychologie ont été mise en œuvre pour formaliser les mécanismes de la vision des couleurs [1,2]. Malgré ces nombreuses études la relation entre la physique de la lumière et la perception colorée reste une inconnue majeure. La géométrie joue un rôle majeur pour unifier les différentes disciplines impliquées dans la connaissance des traitements du système visuel de la photoréception à la perception, comme par exemple dans la neurogéométrie de Petitot en vision des formes [3]. En vision des couleurs de nombreuses publications font également part de géométries [4-10].

Dans l'équipe, nous développons un modèle de géométrie projective en vision des couleurs [11] qui stipule que les variables perceptives seraient la résultante d'une projection des stimuli lumineux sur une surface représentant les attributs chromatiques. Cette projection serait adaptative, modulable et expliquerait les difficultés pour lier la physique de la lumière à la perception colorée. Cette hypothèse est appuyée par une expérience développée dans l'équipe qui mesure l'espace des couleurs propre à un observateur [12]. L'expérience consiste à mesurer le plan d'isoluminance local pour plusieurs points de l'espace couleur par photométrie hétérochromatique en utilisant le stimulus minimum motion [13]. Le vecteur orthogonal au plan local d'isoluminance est appelé le vecteur de luminance. Sa longueur est déterminée à posteriori en mesurant le seuil de détection du stimulus par ajustement. L'ensemble des vecteurs mesurés pour un observateur est un champ de vecteur, un ensemble de couples (x,v) où x est la coordonnée d'un point p dans l'espace couleur et v le vecteur orthogonal au plan d'isoluminance associé à ce point. Pour tous les observateurs testés jusqu'alors, le champ de vecteur est convergent, signifiant une métrique hyperbolique de l'espace couleur. Grâce à la géométrie projective nous avons pu proposer une décomposition de l'espace couleur en nappes d'hyperboloïdes de luminosité perçue constante pour chaque observateur à partir du champ de vecteur mesuré (Figure 1ab).

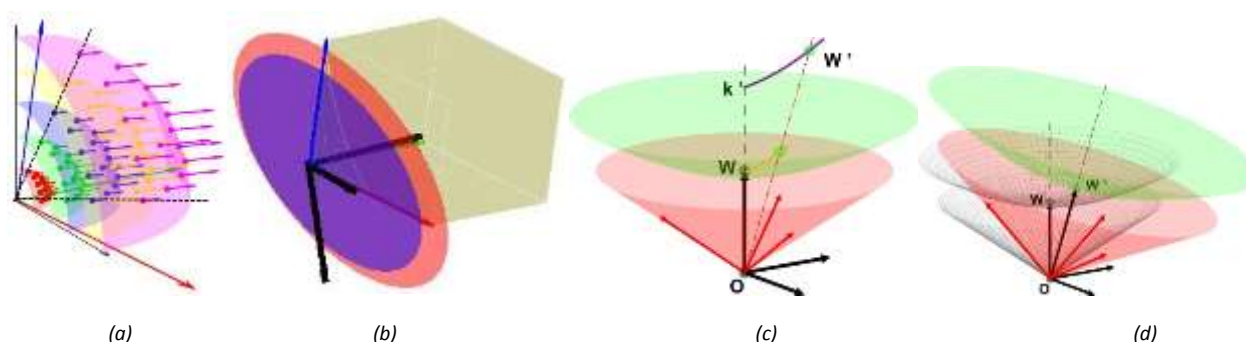


Figure 1 : Mesure de l'espace couleur et son adaptation. (a) Estimation du champ de vecteur pour un observateur dans l'espace couleur de l'écran. (b) Espace hyperbolique correspondant (cône en bleu, hyperboloïde en rouge) représenté dans le cube des couleurs de l'écran. (c) Isométrie de l'espace projectif à métrique hyperbolique laissant invariant la forme quadratique de Minkowski et par conséquent le cône et l'hyperboloïde unitaire. La rotation hyperbolique correspond à l'adaptation issue du changement du vecteur de l'illuminant de W à W' . (d) Transformation projective généralisée pour laquelle l'invariant projectif est modifié.

La question que nous nous posons aujourd'hui et qui fait l'objet du stage est :

Comment l'espace couleur est modifié par le changement de l'état d'adaptation de l'observateur ?

Pour tester les modifications de l'espace couleur avec l'état d'adaptation de l'observateur nous proposons de reproduire l'expérience précédente mais en modifiant l'état d'adaptation de l'observateur en éclairant le box expérimental avec des lumières de couleurs différentes. Nous faisons l'hypothèse (1) que l'espace couleur de l'observateur sera modifié par le changement d'adaptation et (2) que connaissant les radiances spectrales des lumières nous pourrions modéliser les variations de l'espace couleur.

Deux types de transformations inhérentes au changement d'état d'adaptation de l'observateur seront envisagés. Soit une transformation isométrique de l'espace couleur qui ne change pas la métrique hyperbolique et correspond à une rotation hyperbolique (Figure 1c). Soit une transformation projective générale qui modifie l'origine et les axes de l'espace couleur (Figure 1d).

Tâches à réaliser :

- Réplication de l'expérience précédente en changeant les conditions (point de mesure, ordre des mesures, etc...). Analyse de la robustesse de la mesure.
- Mise en place de l'expérience avec modulation de l'adaptation. Recruter les participants, effectuer les passations et analyser les résultats de l'expérience (tester l'hypothèse 1).
- Compléter le modèle projectif avec la prise en compte du changement d'adaptation de l'observateur (tester l'hypothèse 2).
 - Proposer un modèle alternatif qui plutôt que de déduire la surface globale correspondant à l'ensemble du champ de vecteur, se base sur les fonctions de sensibilité des cônes LMS.
 - Intégrer le changement de gain des cônes LMS inhérent à l'adaptation à la couleur mesurée.

Candidat :

Le candidat idéal sera une personne ayant des compétences en psychophysique, mathématiques appliqués, géométrie et une bonne connaissance de Matlab. Ayant conscience que ce profil n'existe pas, le sujet sera adapté pour tout candidat motivé par la relation entre la physique, la physiologie et la perception dans les systèmes sensoriels et montrant une des compétences citées.

Référence

- [1] Gegenfurtner, K. R., & Sharpe, L. T. (Eds.). (2001). *Color vision: From genes to perception*. Cambridge University Press.
- [2] Wyszecki, G., & Stiles, W. S. (2000). *Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae* (Vol. 40). John Wiley & sons.
- [3] Petitot, J. Neurogéométrie de la vision—Modèles mathématiques et physiques des architectures fonctionnelles, 2008. Editions de l'Ecole Polytechnique.
- [4] Schrödinger, E. V. (1920). Outline of a theory of color measurement for daylight vision. *Physics Annual*, 63(4), 397-520.
- [5] Alleysson, D., & Meary, D. (2019). Hyperbolic models for color vision. ([hal-03515596](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03515596))
- [6] Weinberg, J. W. (1976). The geometry of colors. *General relativity and gravitation*, 7, 135-169.
- [7] Yilmaz, H. (1962). On color perception. *The bulletin of mathematical biophysics*, 24, 5-29.
- [8] Cohen, J. B., & Kappauf, W. E. (1987). " Color mixture and fundamental metamers: Theory, algebra, geometry, application," 1985. *American Journal of Psychology*, 100(3), 727.
- [9] Drösler, J. (1994). Color similarity represented as a metric of color space. In *Contributions to mathematical psychology, psychometrics, and methodology* (pp. 19-37). New York, NY: Springer New York.
- [10] Von Schelling, H. (1956). Concept of distance in affine geometry and its applications in theories of vision. *JOSA*, 46(5), 309-315.
- [11] Alleysson, D. (2023) Projective colorimetry, *JOSA*, in revision.
- [12] Alleysson, D., & Méary, D. (2023). Measurement of individual color space using a luminous vector field. *JOSA A*, 40(3), A199-A207.
- [13] Anstis, S., & Cavanagh, P. (1983). A minimum motion technique for judging equiluminance. In *Colour Vision: Psychophysics and Physiology*, eds. Mollon, JD & Sharpe, LT.