

Thèse de Doctorat de l'université Paris Descartes

ED 261 : Cognition, Comportement, Conduites Humaines

TRAITEMENTS PROBABILISTES IMPLICITES DE LA PERCEPTION AMBIGÜE EN VISION HUMAINE

Adrien Chopin

Pascal Mamassian – Directeur de thèse

Jury

Pr Philippe Schyns – Rapporteur

Dr Jean Lorenceau – Rapporteur

Pr Daphné Bavelier - Examineur

Pr Patrick Cavanagh – Examineur

Dr Jean-Michel Hupé – Membre Invité

Laboratoire de Psychologie de la Perception

Université Paris Descartes, Sorbonne Paris Cité et CNRS UMR 8158

VERSION CORRIGEE ET AVANCEE - NON-OFFICIELLE

(UNOFFICIAL CORRECTED AND ADVANCED VERSION)

Mots-clés : perception visuelle, bistabilité, rivalité binoculaire, adaptation, attention, apprentissage perceptif, vision stéréoscopique, utilité.

Résumé

La bistabilité est une surprenante alternance de l'apparence d'un stimulus entre deux interprétations de ce stimulus. Elle a lieu lorsqu'une stimulation physique est très ambiguë, comme lorsque l'on présente une image dans un œil très différente de l'image de l'autre œil (rivalité binoculaire). La bistabilité implique de (1) décider que le stimulus est bistable ; (2) sélectionner le premier percept ; (3) supprimer l'autre percept ; (4) décider quand alterner. Tandis que les deux dernières étapes sont très étudiées, les deux premières étapes restent encore mal connues. Ici, nous approfondissons les connaissances sur les mécanismes qui décident la rivalité plutôt que la fusion (étude 4), sur le choix du premier percept (études 1 à 5) et sur la dynamique bistable (étude 1 et 3). Notamment, la littérature actuelle favorise une explication bas-niveau de la rivalité binoculaire, c'est-à-dire ayant lieu dès les premières étapes de traitement cognitif, avant tout traitement complexe. Le but principal de cette thèse est de clarifier l'influence potentielle sur la rivalité de traitements probabilistes et donc plus complexes.

J'ai étudié (1) l'influence de l'utilité d'une interprétation sur la bistabilité ; (2) la manière de changer les préférences bistables ; (3) la spécificité du ou des premiers percepts ; (4) l'influence d'illusions d'orientations sur la stéréo-fusion et la rivalité ; (5) l'influence du passé sur le percept bistable, sous la forme de prédictions du système.

J'ai trouvé :

- (1) qu'une interprétation utile est perçue plus souvent sur le premier percept d'un épisode de rivalité binoculaire. Cette influence est implicite, non-attentionnelle et implique des calculs probabilistes sur l'utilité d'un percept.
- (2) que l'utilité peut modifier les préférences en rivalité de transparence de mouvement et que ces préférences ont donc pour rôle de favoriser la réussite à une tâche.
- (3) que le premier percept de la rivalité binoculaire n'est pas le seul à être différent des autres et que le contrôle volontaire est plus fort au début d'un épisode bistable pour le percept non-favorisé.
- (4) que l'étape de contraste illusoire entre orientations occupe une position hiérarchique plus basse que les étapes de vision stéréoscopique et de rivalité.
- (5) une forte corrélation positive entre le passé visuel ancien et l'orientation perçue en rivalité binoculaire. Nous expliquons ce résultat par un modèle d'adaptation prédictive selon lequel le système visuel prédit le prochain percept tel que la distribution récente des orientations corresponde à une distribution plus ancienne. Ici encore, des calculs probabilistes sont impliqués.

En résumé, ce travail démontre principalement l'existence de traitements probabilistes en perception ambiguë, par l'intermédiaire d'un calcul d'utilité et de prédictions dans l'adaptation.

Keywords: visual perception, bistability, binocular rivalry, adaptation, attention, perceptual learning, stereopsis, usefulness.

Abstract

Bistability is a surprising alternation of the appearance of a stimulus between two interpretations of that stimulus. It occurs when a physical stimulation is ambiguous, e.g. when very different images are displayed to each eye. Bistability involves (1) a decision that the stimulus has to be bistable; (2) a selection of the first percept; (3) a suppression of the other percept; (4) a decision of when reversing the percepts. While the two first steps have been widely studied, a lot remain to be discovered on the two last steps. Here, we focus on the mechanisms that decide for rivalry rather than fusion (study 4), that choose the first percept (studies 1 to 5) and on bistable dynamics (studies 1 and 3). Moreover, the literature tends to support a low-level explanation of binocular rivalry, i.e. occurring as soon as the first steps of cognitive computation, before any complex calculation. One of the main goals of this work is to clarify the potential influence of probabilistic processes that may be more complex.

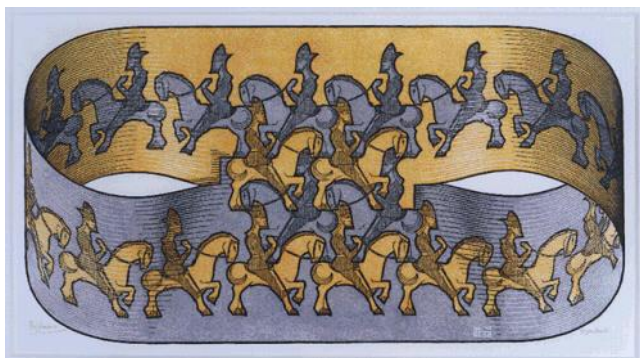
I studied (1) the influence of one interpretation's usefulness on bistability; (2) the way of changing bistable preferences; (3) the specificity of the first percepts; (4) the influence of orientation illusion on stereo-fusion and rivalry; (5) the influence of past stimuli on the bistable percept through predictions.

I found that:

- (1) One useful interpretation is perceived more often on the first percept of a bistable episode of binocular rivalry. This influence is implicit, not attentional and implies probabilistic computations about percept usefulness.
- (2) Usefulness can change preferences for motion transparency depth rivalry: those preferences are therefore aimed at increasing the observer's success to a task.
- (3) The first percept of binocular rivalry is not the only one to be different from the others and that voluntary control is more effective at the beginning of a bistable episode for the not preferred percept.
- (4) The step of illusory contrast between orientations occurs lower in the hierarchy relative to stereopsis and binocular rivalry.
- (5) A strong positive correlation between the remote visual past and the current perceived orientation in binocular rivalry. We explained this finding with a model of predictive adaptation according to which the visual system predicts the next percept following the following rule: the recent distribution of orientations has to match the remote past distribution. Here again, probabilistic computations are involved.

To summarize, this work mainly uncovers the existence of probabilistic computations in ambiguous perception through usefulness computation and predictions in adaptation.

Remerciements



Cavalier

Maurits Cornelis Escher

1945

J'ai remarqué que la plupart des gens abordaient la lecture d'une thèse en commençant par cette page de remerciements, comme si elle en était le couronnement, l'essence. Je ne connais pas la raison de ce phénomène, mais je me suis surpris à faire la même chose. Très souvent aussi, la lecture de la thèse s'achève avec cette page. La première version des remerciements était une liste infinie de « merci » pour toutes les personnes appréciables et susceptibles de désirer être remerciées. Finalement, plutôt que de décevoir beaucoup les quelques personnes oubliées, j'ai décidé de décevoir un peu tout le monde mais également. Je ne remercie donc presque personne par son nom mais si vous en êtes vexés, c'est que vous faites définitivement partie des personnes que je remercie. Je fais quelques exceptions pour les personnes qui m'ont aidé académiquement et que je n'ai pas encore remerciées dans les articles.

Par exemple, je remercie infiniment mon directeur de thèse, Pascal. Il a su m'orienter avec sagesse et créativité à travers mes travaux et canaliser mon énergie pour que j'atteigne les objectifs que je m'étais fixés. Il a pu m'accorder le temps dont j'avais besoin malgré un emploi du temps continuellement titanesque. Je lui suis reconnaissant de m'avoir guidé à travers le monde de la recherche en me permettant de diffuser largement mes travaux jusqu'en Floride.

Je remercie les membres de mon jury de me faire l'honneur de considérer mon travail, tout particulièrement les rapporteurs. Je sais que certains membres ont dû aménager sévèrement leur emploi du temps afin d'être présents : merci !

Un grand merci aux étudiants et chercheurs du laboratoire de Psychologie de la Perception pour l'excellente ambiance et l'émulation intellectuelle. Je pense notamment à Simon Barthelmé qui m'a apporté le terreau de certaines recherches (comme le concept du paradoxe du joueur). Je remercie spécialement Marie de Montalembert pour son soutien pendant la dernière ligne. Je suis reconnaissant à toutes les personnes qui ont eu la gentillesse de me donner leur avis sur mon travail et de m'aider à l'améliorer. Et merci aux relecteurs, Jennifer Lalanne, Marie de Montalembert, Marina Zannoli, Anissa Aliyahia, Mohammed Ghezal, Nathalie Genty, Hadwig Chopin et Fabio Puzzo. Je remercie aussi Victor et Francis.

Je veux témoigner toute ma reconnaissance à Randolph Blake et son équipe pour leur accueil chaleureux à l'université de Vanderbilt. Cela a été inestimable d'être immergé au contact direct des personnes qui demain feront la recherche sur mon sujet de thèse : Jan Brascamp, Sam Ling, Eunice Yang, Mink-Suk Kang ou Sang Wook Hong. Je remercie l'université Descartes de m'avoir apporté les financements supplémentaires pour ce séjour, et l'Ecole Doctorale 261 pour m'avoir accordé le financement des trois ans de thèse.

Je remercie tout autant Julie Harris pour son accueil à l'université de St. Andrews et Raymond van Ee pour avoir eu la gentillesse de me confier ses données pour mon analyse.

Un remerciement spécial à toutes les personnes qui m'ont aidé dans les activités hors-thèse mais couplées à la thèse notamment aux directeurs d'UE qui ont accepté de me confier l'enseignement de 208 h de TD.

Je remercie enfin Jennifer Lalanne pour son amour durant ces années si enrichissantes et merci à ma famille d'être là. Je leur dédie cette thèse.

Articles associés

- Chopin, A., Mamassian, P. , & Blake, R. (en préparation). Stereopsis and rivalry are based on perceived rather than physical orientations.
- Chopin, A., & Mamassian, P. (soumis à *Current Biology*). Predictive properties of adaptation.
- Harris, J., Chopin, A., Zeiner, K., & Hibbard, P. (sous presse). Perception of relative depth interval: systematic biases in perceived depth. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*.
- Chopin, A., & Mamassian, P. (2011). Usefulness Influences Visual Appearance in Motion Transparency Depth Rivalry. *Journal of Vision*, 11(7). doi:10.1167/11.7.18.
- Chopin, A., & Mamassian, P. (2010). Task usefulness affects perception of rivalrous images. *Psychological Science*, 21(12): 1886-93.

Sommaire

Résumé.....	viii
Abstract.....	x
Remerciements.....	xii
Articles associés.....	xiv
Sommaire.....	xvi
Glossaire rapide.....	xxx
Chapitre 1 : Introduction générale.....	2
Chapitre 2 : Partie théorique – Introduction aux mécanismes de la perception bistable.....	6
I. Propriétés de la perception bistable.....	6
I.A Les principales propriétés définissant la bistabilité.....	6
I.B Réévaluation des propriétés établies et nouvelles propriétés.....	7
I.B.1 Caractère irrépressible.....	7
I.B.2 Exclusivité des percepts.....	9
I.B.3 Caractère aléatoire des renversements.....	10
I.B.4 Distribution des phases bistables.....	11
I.B.5 Différents régimes de bistabilité.....	12
I.B.6 Spécificité du premier percept.....	12
(a) Durées de phase et rivalité d'apparition.....	12
(b) Inférence Bayésienne.....	13
Boîte 1 : Introduction au cadre général de l'inférence Bayésienne.....	14
I.B.7 Loi du Partage Complémentaire et force d'un stimulus.....	15
I.B.8 Principes de Levelt.....	16
I.B.9 Indépendance entre mécanismes de renversement et de suppression.....	17
I.C Causes possibles des renversements.....	18
I.C.1 Variations d'accommodation.....	19

I.C.2 Rôle de la pupille.....	19
I.C.3 Adaptation	20
I.C.4 Bruit.....	21
I.C.5 Oscillateur sous-cortical	22
I.C.6 Coupures attentionnelles	22
I.C.7 Saccades et mouvements oculaires	22
I.C.8 Influence motrice.....	23
I.C.9 Exploration libre	24
II. La rivalité binoculaire	25
II.A La hiérarchie des différentes rivalités	25
II.A.1 Rivalité interoculaire et entre orientations	26
II.A.2 Rivalité de couleur.....	29
II.A.3 Rivalité de mouvement.....	30
II.A.4 Interactions entre compétitions	31
II.A.5 Niveau hiérarchique des compétitions	33
II.B La vision normale est-elle cyclopéenne ?.....	34
II.C Qu'est-ce qui est supprimé en rivalité?.....	36
II.D Relations entre rivalité binoculaire et vision stéréoscopique	37
II.E Relation entre rivalité et figures ambiguës	39
II.E.1 Propriétés similaires.....	39
II.E.2 Différences rivalité / figures ambiguës.....	40
II.E.3 Corrélations et synchronisations	40
II.F Bases biologiques.....	41
II.G Modèles de la rivalité binoculaire.....	42
III. Rôle de l'attention dans la perception bistable.....	46
III.A Les différentes formes d'attention.....	46

III.A.1 Ressource attentionnelle	47
III.A.2 Mécanisme sélectif de l'attention	47
(a) Attention exogène	48
(b) Attention endogène.....	48
(c) Effect of attentional selection on contrast appearance.....	49
III.B Influence du contrôle volontaire, des ressources attentionnelles.....	49
III.B.1 Théorie attentionnelle des renversements	49
III.B.2 Working memory load and reversals.....	51
III.B.3 Contrôle volontaire de la bistabilité	52
III.C Influence de l'attention exogène	53
III.D Influence de l'attention endogène.....	53
III.E Liaison entre bistabilité et d'autres phénomènes attentionnels	55
III.E.1 Suppression et attention	55
III.E.2 Cécité inattentionnelle et cécité au changement.....	55
III.F Influence de la tâche.....	57
III.F.1 Influence motrice directe sur le percept bistable	57
III.F.2 Influence de la tâche en vision	57
III.F.3 Influence de la tâche en vision bistable.....	58
III.F.4 Influence de l'utilité dans le déploiement de l'attention.....	59
(a) Utilité et attention spatiale.....	59
(b) Utilité et attention d'objet.....	60
(c) Utilité et amorçage du pop-out	60
IV. Adaptation, mémoire et bistabilité.....	61
IV.A Adaptation et bistabilité.....	61
IV.B Adaptation et effets consécutifs	62
IV.B.1 Théorie des canaux : Exemple de l'effet consécutif de fréquence spatiale.	62

IV.B.2 Théorie de la fatigue neuronale.....	64
IV.C Intérêts de la théorie de la fatigue neuronale.....	64
IV.C.1 Paradoxe de distance	64
IV.C.2 Effets consécutifs sans paradoxe de distance	65
IV.C.3 Exemple des images consécutives	66
IV.C.4 Exemple des effets consécutifs de mouvement.....	66
IV.C.5 De nouvelles données sur les paradoxes de distance.....	68
IV.D Défauts de la théorie de la fatigue neuronale	70
IV.D.1 Phénomène de stockage	70
IV.D.2 Gain de réponse et gain de contraste	70
IV.E Les explications alternatives de l'adaptation.....	72
IV.E.1 La décorrélation	72
IV.E.2 La correction d'erreur.....	74
IV.E.3 Le recalibrage.....	75
IV.E.4 Le cadre Bayésien.....	75
IV.F Adaptation à long terme	76
IV.G Transfert d'adaptation et adaptation sous suppression	77
IV.G.1 Transfert interoculaire.....	77
IV.G.2 Adaptation sous suppression	78
IV.G.3 Adaptation comme cause des renversements.....	79
IV.H Mémoire et hystérésis dans la bistabilité.....	79
IV.H.1 Dépendances entre percepts.....	79
IV.H.2 Hystérésis.....	80
IV.H.3 Stabilisation en présentation intermittente.....	80
IV.H.4 Préférences stables.....	81
V. Apprentissage visuel.....	Error! Bookmark not defined.

V.A Apprentissage statistique	Error! Bookmark not defined.
V.A.1 Déploiement attentionnel.....	Error! Bookmark not defined.
V.B Conditionnement probabiliste	Error! Bookmark not defined.
V.C Apprentissage d'une apparence bistable	Error! Bookmark not defined.
V.C.1 Par conditionnement probabiliste	Error! Bookmark not defined.
V.C.2 Par l'influence de prédictions.....	Error! Bookmark not defined.
V.D Apprentissage perceptif comme augmentation de sensibilité... Error! Bookmark not defined.	
V.D.1 Rôle de l'attention.....	Error! Bookmark not defined.
V.D.2 Rôle de la récompense interne.....	Error! Bookmark not defined.
V.D.3 Fast phase of perceptual learning	Error! Bookmark not defined.
V.D.4 Specificity of learning and transfer	Error! Bookmark not defined.
V.D.5 Transfer of learning with double training	Error! Bookmark not defined.
V.E Processes of learning.....	Error! Bookmark not defined.
V.E.1 How to resolve the Vernier task precisely?... Error! Bookmark not defined.	
V.F Learning in video games.....	Error! Bookmark not defined.
V.F.1 General learning (serious games).....	Error! Bookmark not defined.
V.F.2 Learning to learn	Error! Bookmark not defined.
VI. The perception of depth.....	Error! Bookmark not defined.
VI.A Pictorial and monocular cues.....	Error! Bookmark not defined.
VI.A.1 Cast shadows.....	Error! Bookmark not defined.
VI.A.2 Monocular zones.....	Error! Bookmark not defined.
VI.A.3 Motion parallax	Error! Bookmark not defined.
VI.A.4 Familiar size, size change, texture gradient and relative size..... Error!	
Bookmark not defined.	
VI.A.5 Distance to horizon.....	Error! Bookmark not defined.

VI.A.6 Vergence.....	Error! Bookmark not defined.
(a) Basics about vergence	Error! Bookmark not defined.
(b) Vergence acuity.....	Error! Bookmark not defined.
VI.A.7 Focus cues: accommodation and blur gradient	Error! Bookmark not defined.
VI.A.8 Vertical disparity	Error! Bookmark not defined.
VI.B Stereopsis	Error! Bookmark not defined.
VI.B.1 Basics	Error! Bookmark not defined.
(a) From disparities to depth metrics.....	Error! Bookmark not defined.
VI.B.2 Stereoscopic displays.....	Error! Bookmark not defined.
VI.B.3 Diplopia vs. rivalry	Error! Bookmark not defined.
VI.B.4 Fusion rules - Is disparity processing possible for stimuli outside of the Panum area?	Error! Bookmark not defined.
(a) Disparity gradient	Error! Bookmark not defined.
(b) Fusion limits.....	Error! Bookmark not defined.
(c) Outside of Panum area: patent and latent stereopsis.....	Error! Bookmark not defined.
(d) The potential fallacy of patent stereopsis in diplopia.....	Error! Bookmark not defined.
(e) Field anisotropies.....	Error! Bookmark not defined.
VI.B.5 How to measure stereoacuity psychophysically?	Error! Bookmark not defined.
VI.B.6 The different sub-systems of stereopsis	Error! Bookmark not defined.
(a) Crossed vs. uncrossed disparity processing.....	Error! Bookmark not defined.
(b) Motion in depth vs. static stereo systems	Error! Bookmark not defined.
(c) Absolute vs relative	Error! Bookmark not defined.
(d) Coarse vs. fine stereopsis.....	Error! Bookmark not defined.
(e) Monocular information to avoid in stereopsis task.....	Error! Bookmark not defined.
(f) First-order vs. second order stereopsis.....	Error! Bookmark not defined.

VI.B.7 Head-centric stereopsis	Error! Bookmark not defined.
VI.B.8 Eccentricity and target separation	Error! Bookmark not defined.
VI.B.9 Using Gabors: the effect of spatial frequency.....	Error! Bookmark not defined.
VI.B.10 Exposure time and acuity	Error! Bookmark not defined.
VI.B.11 Delta vergence and stereopsis.....	Error! Bookmark not defined.
VI.B.12 Slant: how stereoscopic slant is processed?	Error! Bookmark not defined.
VI.B.13 Motion in depth and stereopsis	Error! Bookmark not defined.
VI.B.14 Luminance (energy) and Bloch's Law?	Error! Bookmark not defined.
VI.B.15 The caveats to avoid with RDS	Error! Bookmark not defined.
VI.B.16 Clinical tests	Error! Bookmark not defined.
VI.B.17 Acuity: what is a normal performance?.....	Error! Bookmark not defined.
VI.B.18 Acuity: what is best measured acuity?.....	Error! Bookmark not defined.
VI.B.19 Acuity: is there any group differences?	Error! Bookmark not defined.
(a) Gender difference.....	Error! Bookmark not defined.
VI.B.20 Acuity: does it depends on IOD?	Error! Bookmark not defined.
VI.C Neural basis for stereopsis	Error! Bookmark not defined.
VI.C.1 V1 cortex.....	Error! Bookmark not defined.
VI.C.2 V2 cortex.....	Error! Bookmark not defined.
VI.C.3 V3 cortex.....	Error! Bookmark not defined.
VI.C.4 Ventral vs. dorsal streams.....	Error! Bookmark not defined.
VI.C.5 V3A and V3B/KO cortices (dorsal).....	Error! Bookmark not defined.
VI.C.6 MST (dorsal)	Error! Bookmark not defined.
VI.C.7 V5/MT/hMT+ cortex (dorsal)	Error! Bookmark not defined.
VI.C.8 V4 (ventral)	Error! Bookmark not defined.

VI.C.9 IT (ventral)	Error! Bookmark not defined.
VI.C.10 Beyond those areas	Error! Bookmark not defined.
VI.C.11 Corpus Callosum.....	Error! Bookmark not defined.
VI.C.12 Stereoblind brain activity when stereoscopic stimulation.....	Error! Bookmark not defined.
	Bookmark not defined.
VI.C.13 Plasticity and development.....	Error! Bookmark not defined.
VI.D Models of stereopsis	Error! Bookmark not defined.
VI.E Stereoblindness.....	Error! Bookmark not defined.
VI.E.1 Is stereoblindness a problem?.....	Error! Bookmark not defined.
VI.E.2 How many people are stereoblind?	Error! Bookmark not defined.
(a) First paper: Richards (1970)	Error! Bookmark not defined.
(b) Tam and Stelmach's presentation time argument.....	Error! Bookmark not defined.
(c) Patterson's team studies.....	Error! Bookmark not defined.
(d) The difficulty of interpreting depth in RDS.....	Error! Bookmark not defined.
(e) Clinical Randot test results for 13-years-old children.....	Error! Bookmark not defined.
(f) Two large studies with small disparities.....	Error! Bookmark not defined.
(g) Modular aspects of stereoblindness.....	Error! Bookmark not defined.
VI.E.3 Why observers become stereoblind?	Error! Bookmark not defined.
VI.E.4 Stereopsis recovery: Can we learn stereopsis?	Error! Bookmark not defined.
	defined.
(a) Critical periods	Error! Bookmark not defined.
(b) Cues that plasticity exists after critical periods.....	Error! Bookmark not defined.
(c) First examples of recovery from stereoblindness in amblyopic and strabismic patients	Error! Bookmark not defined.
(d) Fusion training and stereopsis recovery for strabismic and TGI patients.....	Error! Bookmark not defined.
(e) Perceptual learning of stereopsis in normal subjects.....	Error! Bookmark not defined.
(f) Perceptual learning of stereopsis in amblyopic subjects.....	Error! Bookmark not defined.

(g) Stereopsis recovery by perceptual learning/cue deprivation in amblyopic patients	Error! Bookmark not defined.
(h) Stereopsis recovery by dichoptic video game playing in amblyopic patients	Error! Book
VI.E.5 Stereoblindness neural determinants.....	Error! Bookmark not defined.
(a) Brain effect of training and stereopsis recovery	Error! Bookmark not defined.
VI.F Cue conflict and depth cue efficiency as a function of distance	Error! Bookmark not defined.
VI.F.1 Stereopsis and distance.....	Error! Bookmark not defined.
VI.F.2 Other cues	Error! Bookmark not defined.
VII. Binocular combination	Error! Bookmark not defined.
VII.A A gain control theory of binocular combination	Error! Bookmark not defined.
VIII. Amblyopia: a binocular pathology	Error! Bookmark not defined.
VIII.A What is amblyopia?	Error! Bookmark not defined.
VIII.A.1 Definition	Error! Bookmark not defined.
VIII.A.2 Prevalence	Error! Bookmark not defined.
VIII.A.3 The different types of amblyopia.....	Error! Bookmark not defined.
(a) The terminology of strabismus pathology...	Error! Bookmark not defined.
VIII.A.4 What are the deficits in amblyopia?	Error! Bookmark not defined.
(a) Do all amblyopic observers suffer from stereoblindness?	Error! Bookmark not defined.
VIII.A.5 Is amblyopic eye image suppressed?	Error! Bookmark not defined.
VIII.A.6 What are the compensatory mechanisms of amblyopia?	Error! Bookmark not defined.
VIII.A.7 Does amblyopia results in visible brain changes?	Error! Bookmark not defined.
VIII.B Can we treat amblyopia?	Error! Bookmark not defined.
IX. Litterature on neurostimulation	Error! Bookmark not defined.
IX.A t-DCS	Error! Bookmark not defined.

X. Digression toward general points of view about cognitive abilities	Error! Bookmark not defined.
X.A Human intelligence.....	Error! Bookmark not defined.
X.A.1 Does the factor G exist?.....	Error! Bookmark not defined.
XI. Introduction à quelques problèmes généraux.....	82
XI.A L'artilleur	82
XI.B Roulette de casino et image consécutive martienne.....	83
Chapitre 3 : Partie expérimentale - Influence de l'utilité d'un percept sur la bistabilité.....	86
I. Introduction.....	86
II. Étude 1 : L'utilité de la tâche influence l'apparence d'orientations en rivalité binoculaire	87
II.A Article: Chopin, A., & Mamassian, P. (2010). Task usefulness affects perception of rivalrous images. <i>Psychological Science</i> , 21(12): 1886-93.	87
III. Étude 2 : L'utilité de la tâche influence l'apparence de la transparence de mouvement.....	98
III.A Article: Chopin, A., & Mamassian, P. (2011). Usefulness Influences Visual Appearance in Motion Transparency Depth Rivalry. <i>Journal of Vision</i> , 11(7). doi:10.1167/11.7.18.....	98
IV. Discussion.....	108
IV.A Relation avec le cadre Bayésien	108
IV.B Relation avec le conditionnement probabiliste	110
Chapitre 4 : Spécificité des premiers percepts Etude 3	112
V. Partie I : Réanalyse exploratoire des données de van Ee et al. (2005).....	112
V.A Introduction	112
V.B Résumé de la méthode.....	112
V.C Résultats : Préférence transitoire.....	113
VI. Partie II : Expérience.....	114
VI.A Introduction.....	114

VI.B Méthode.....	115
VI.B.1 Observateurs	115
VI.B.2 Stimuli	115
VI.B.3 Matériel.....	115
VI.B.4 Procédure	116
VI.C Résultats.....	117
VI.C.1 Préférence transitoire.....	117
VI.C.2 Durées de phase	117
VII. Discussion de l'étude 3	118
Chapitre 5 : Niveau hiérarchique de la compétition entre orientations en rivalité binoculaire	120
VIII. Introduction.....	120
IX. Étude 4 : La rivalité binoculaire et la stéréopsie utilisent les orientations perçues illusaires et non les orientations réelles.....	120
X. Discussion.....	134
Chapitre 6 : Influence des attentes en rivalité binoculaire.....	136
XI. Introduction	136
XII. Étude 5 : Propriétés prédictives de l'adaptation.....	136
XIII. Discussion.....	164
Chapitre 7 : Discussion et perspectives.....	169
XIV. Etudes 1 et 2.....	169
XV. Etudes 3 et 4	170
XVI. Etude 5	171
XVII. Conclusion	173
Références	175
Annexes	a

XVIII. Annexe 1 : Modèle	a
XVIII.A Rivalité d'orientation	a
XVIII.A.1 Réseau de base.....	a
XVIII.A.2 Illusions et groupements interoculaires	c
XVIII.A.3 Vision stéréoscopique.....	d
XVIII.A.4 Rivalité de mouvement	e
XVIII.A.5 Modèle complet	f
XIX. Annexe 2 : Article	h
XIX.A Harris, J., Chopin, A., Zeiner, K., & Hibbard, P. (in press). Perception of relative depth interval: systematic biases in perceived depth. <i>Quarterly Journal of Experimental Psychology</i>	h
XX. Material.....	i
XX.A Stereoscopic devices for stereopsis and rivalry.....	i
XXI. Appendices 3: Psychophysical technics.....	Error! Bookmark not defined.
XXI.A Optics	Error! Bookmark not defined.
XXI.A.1 Filters	Error! Bookmark not defined.
XXI.B Optometric testing technics.....	Error! Bookmark not defined.
XXI.B.1 Contrast acuity measures	Error! Bookmark not defined.
XXI.B.2 Rappel : le MAR.....	Error! Bookmark not defined.
XXI.B.3 Progression de l'acuité visuelle.....	Error! Bookmark not defined.
XXI.B.4 Tableau de conversion des acuités visuelles	Error! Bookmark not defined.
XXI.B.5 Sub-pixel acuity	Error! Bookmark not defined.
XXI.C Estimating threshold and acuity.....	Error! Bookmark not defined.
XXI.C.1 Basics.....	Error! Bookmark not defined.
XXI.C.2 Staircases	Error! Bookmark not defined.
XXI.C.3 Method of single stimuli	Error! Bookmark not defined.

XXI.C.4 Signal detection theory – the 4 cases of discrimination and detection tasks	Error! Bookmark not defined.
XXI.C.5 Criterion vs. bias.....	Error! Bookmark not defined.
XXI.C.6 Magnitude estimates and adjustments	Error! Bookmark not defined.
XXI.C.7 From magnitude estimates to acuity	Error! Bookmark not defined.
XXI.C.8 Basics for sigmoids	Error! Bookmark not defined.
XXI.D Weber-Fechner vs. Stevens	Error! Bookmark not defined.
XXI.E Statistics.....	Error! Bookmark not defined.
XXI.E.1 pearman’s vs. Pearson’s correlation	Error! Bookmark not defined.
XXI.E.2 Reporting power for positive predictive value.....	Error! Bookmark not defined.
XXI.E.3 Non-parametric statistics	Error! Bookmark not defined.
XXI.E.4 Effect size and sample size determination	Error! Bookmark not defined.
XXI.E.5 Instruction check.....	Error! Bookmark not defined.
Additional Bibliography (Endnote).....	j
Additional Bibliography (Mendeley).....	q

Glossaire rapide

Ambiguïté : Propriété d'un stimulus ou d'un percept de pouvoir être interprété de plusieurs manières par le système cognitif.

Attention : A moins que je ne précise l'inverse, je réfère au mécanisme de sélection par opposition au concept de ressource attentionnelle (cf. introduction, section III.A pour plus de détails).

Bistabilité : La bistabilité est une alternance entre percepts tandis que la stimulation physique reste fixe.

Gabor : Stimulus dont la luminance varie sinusoïdalement sous une enveloppe Gaussienne.

Implicite (traitement) : Qui se produit sans que le sujet ait eu l'intention de le déclencher.

Perturbation : Modification abrupte et transitoire de luminance (en anglais : *transient*).

Phase : Période de dominance exclusive d'un percept.

Plaid : Deux réseaux orthogonaux superposés.

Réseau : Alternance de bandes claires et sombres parallèles (en anglais : *grating*).

Rivalité d'apparition : Mécanismes en jeu lors de l'apparition des stimuli en rivalité binoculaire, créant le premier percept (en anglais : *onset rivalry*).

Rivalité d'orientation : Paradigme dans lequel des réseaux sont présentés à chaque œil, perpendiculaires entre les yeux. A ne pas confondre avec la rivalité (dans le sens compétition) entre orientations qui est un mécanisme sous-jacent de la rivalité d'orientation (et qui serait traduit en anglais par *stimulus rivalry*).

Rivalité permutée : Paradigme de rivalité binoculaire dans lequel les images des yeux sont échangées à une certaine fréquence tandis qu'elles clignotent à une fréquence plus élevée (en anglais : *flicker and swap rivalry*).

Suppression/facilitation flash : Paradigme dans lequel la présentation de l'image d'un œil avant l'autre déclenche la suppression ou la dominance de l'autre image (en anglais : *flash suppression/facilitation*).

Suppression flash continue : Paradigme dans lequel des perturbations sont continuellement appliquées à un œil (en y présentant des rectangles colorés comme les tableaux de Mondrian), créant une longue suppression de l'autre œil (en anglais : *continuous flash suppression*).

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GENERALE



Reptiles

Maurits Cornelis Escher

Lithographie, 1943

La perception visuelle est toujours ambiguë. Un exemple classique illustrant ceci est la perception simultanée de la taille et de la profondeur d'un objet. Chaque image rétinienne est compatible avec une infinité d'objets plus ou moins grands placés plus ou moins loin : comment choisir le bon couple taille-distance (Figure 1a) ? Il est possible de se baser sur la taille probable de l'objet mais comment même reconnaître la forme de l'objet quand une infinité de formes est compatible avec l'image rétinienne (Figure 1b) ? Pourtant, nous sentons rarement ces ambiguïtés : Le système visuel est presque toujours capable de choisir une solution, en faisant des inférences non-conscientes complexes (von Helmholtz, 1867) sans effort apparent de notre part. Une fois choisie, cette solution est maintenue stable. Toutefois, le système a ses limites : L'un des aspects les plus troublants de la perception visuelle est la perte de cette stabilité, lorsque l'incertitude est trop grande. La conscience alterne alors entre deux interprétations : c'est la *bistabilité*.

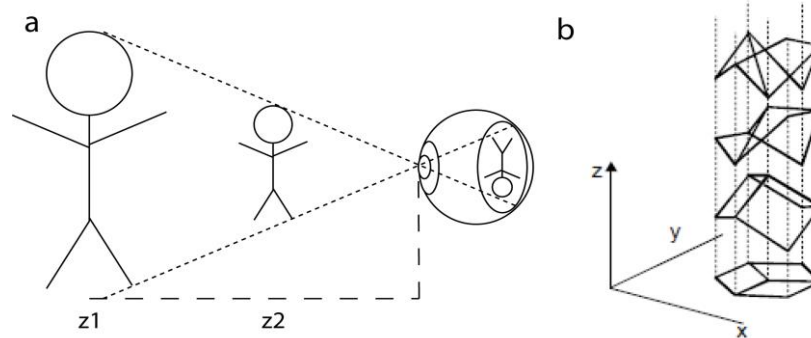


Figure 1 : a) L'image rétinienne peut être le résultat d'un objet à une distance z_1 ou du même objet plus petit et plus proche, en z_2 . b) La même image rétinienne peut être issue de la projection d'un nombre infini d'objets. Le panneau b est issu de Sinha et Adelson (1993).

De nombreux stimuli bistables ont été découverts. Une des plus anciennes formes de bistabilité est la rivalité binoculaire (Porta, 1593; d'après Wade, 2005; DuTour, 1760; Du Tour, 1763; Wheatstone, 1838; Breese, 1909; Diaz-Caneja, 1928). Elle se produit lorsque les images présentées aux deux yeux sont très différentes, par exemple lorsqu'un réseau de lignes verticales est présenté dans un œil et un réseau de lignes horizontales dans l'autre (Figure 2b), ou deux couleurs différentes, ou une image de visage et une image de maison (Figure 2a). Pour présenter ces images différentes, un jeu de miroir, appelé stéréoscope (Figure 2c) est habituellement utilisé mais d'autres techniques existent (lunettes polarisées, anaglyphes, obturatrices).

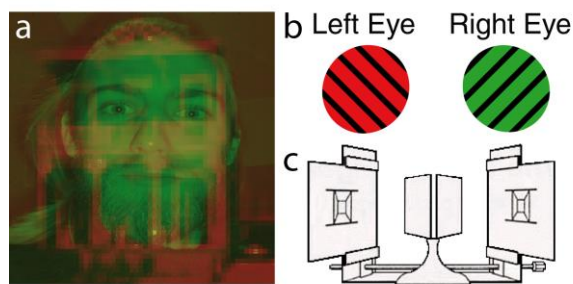


Figure 2 : Rivalités binoculaires. a) Visage-maison : ce stimulus nécessite des lunettes anaglyphes. b) Rivalité d'orientation et de couleur. Une impression du stimulus peut être obtenue par fusion croisée mais il nécessite normalement le stéréoscope dessiné en c).

Les autres stimuli bistables peuvent être regroupés dans une classe qu'on appelle *figures ambiguës* ou *réversibles*. Cette classe doit-elle inclure la rivalité binoculaire ? Je développe cette question en section II.E de l'introduction. Il existe de nombreuses figures ambiguës mais peu sont étudiées en laboratoire. Je présente ici les stimuli auxquels je ferai référence par la suite dans cette thèse. Le **cube de Necker** (Necker, 1832; Wade, Campbell, Ross, & Lingelbach, 2010 pour un historique), **l'escalier de Schröder** (Schröder, 1858) ou la carte pliée (dite aussi **livre de Mach**) sont ambigus sur le point de vue par rapport à l'objet (Figure 3a, b et c). Le **canard lapin** (vraisemblablement de 1892, d'un article anonyme du journal *Fliegende Blätter*) est ambigu sur

l'objet identifié (Figure 3d). La **rivalité monoculaire** (Breese, 1899) se produit après quelques instants passés à fixer le stimulus sans stéréoscope (Figure 3e) : certaines lignes disparaissent puis réapparaissent. Le **vase de Rubin** (Rubin, 1915, 1921; mais voir aussi: Piccolino & Wade, 2006) est ambigu sur l'identification du fond par rapport à l'objet : deux visages ou un vase peuvent être perçus en fonction du choix de ségrégation figure-fond (Figure 3i). Le mouvement apparent des **quadruplets de points** (von Schiller, 1933; Ramachandran & Anstis, 1985, 1986) peut être perçu comme horizontal ou vertical en fonction de la correspondance spatio-temporelle choisie (Figure 3h). La **rivalité de plaids en mouvement** (Wallach, 1935) a lieu lorsque des réseaux perpendiculaires (Figure 3f) sont en mouvement : ils peuvent être perçus comme cohérents (un mouvement) ou séparés (deux mouvements)¹. Les figures **en rotation**² (Wallach & O'Connell, 1953) se basent sur l'ambiguïté du sens de rotation lors de l'effet de profondeur de mouvement (KDE, Figure 3j). La **pyramide-couloir** (Girgus, Rock, & Egatz, 1977) est ambiguë sur le point de vue et la forme 3D (Figure 3g). Le stimulus du **diamant** (Lorenceau & Shiffrar, 1992)³ peut être perçu comme un diamant en rotation derrière des occlusions ou comme quatre segments indépendants en mouvement (Figure 3k). Dans les **grilles de points bistables** (Kubovy, 1994), les points peuvent être groupés comme des lignes verticales ou horizontales (Figure 3m). Dans la **cécité induite par le mouvement** ou MIB (Bonneh, Cooperman, & Sagi, 2001), des points fixes disparaissent et réapparaissent tandis qu'une grille est en rotation par-dessus⁴. Quand des indices de profondeur divergent, ils sont souvent fusionnés. Pourtant, lorsque perspective et disparité sont incompatibles, la **rivalité d'inclinaison** (van Ee, van Dam, & Erkelens, 2002) s'installe (Figure 3o). Un **mouvement biologique** (quelques points en mouvements interprétés comme un humain qui marche) de trois-quarts (Vanrie, Dekeyser, & Verfaillie, 2004) peut être perçu comme vu de face ou de dos (Figure 3n). La **rivalité de transparence de mouvement** (Mamassian & Wallace, 2010) a lieu lorsque des points aléatoires donnent l'impression de deux surfaces se déplaçant dans des directions opposées : le stimulus est alors ambigu sur la surface qui est perçue devant l'autre (Figure 3l).

La bistabilité est un phénomène perceptif très général. D'autres modalités peuvent être bistables comme l'olfaction (Zhou & Chen, 2009) ou l'audition. Dans l'audition bistable (Bregman, 1994), un flux est perçu comme cohérent (notes hautes et basses alternantes) ou comme deux flux

¹ Démonstration : http://www.cns.nyu.edu/~hupe/arvo01demo/demo_plaids.html

² Démonstration : <http://www.cogsci.uci.edu/~ddhoff/Sphere3.html>

³ Démonstration : <http://web.mit.edu/persci/demos/Motion&Form/square/square.html>

⁴ Démonstration : <http://www.weizmann.ac.il/home/masagi/MIB/mib.html>

(une série de notes hautes et une série de notes basses). La bistabilité est aussi largement trouvée dans le monde animal : singes ou pigeons éprouvent de la bistabilité (Logothetis & Schall, 1989; Vetter, Haynes, & Pfaff, 2000).

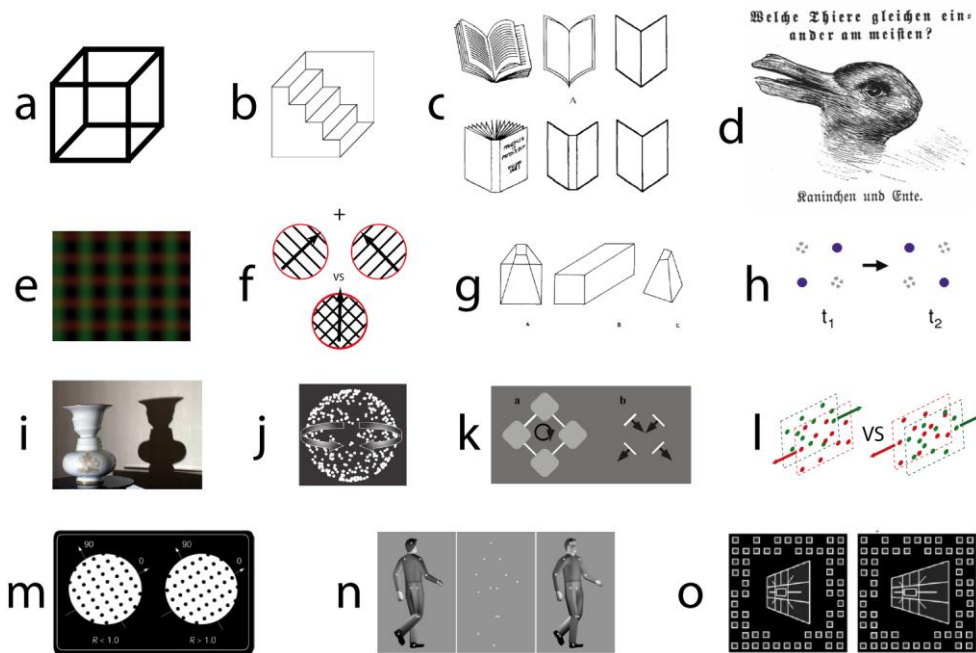


Figure 3 : Figures ambiguës. a) Cube de Necker ; b) Escalier de Schröder ; c) Livre de Mach [figure issue de Rock, Hall & Davis (1994)] ; d) Canard-lapin ; e) Rivalité monoculaire ; f) Rivalité de plaids en mouvement ; g) Pyramide-couloir ; h) Quadruplets de points ; i) Vase de Rubin ; j) Sphère en rotation [figure issue de Klink, van Ee & van Wezel (2008)] ; k) Stimulus du diamant ; l) Rivalité de transparence de mouvement ; m) Grilles de points bistables [figure issue de Gepshtein & Kubovy (2005)] ; n) Mouvement biologique ambigu [figure issue de Vanrie et al. (2004)] ; o) Rivalité d'inclinaison [figure issue de van Ee (2005)].

La rivalité binoculaire a d'abord fasciné de célèbres philosophes et chercheurs, certains à l'origine de l'étude scientifique de la perception ou de la psychologie (Wheatstone, 1838; James, 1891; Sherrington, 1906; von Helmholtz, 1911; Wittgenstein, 1953). Ces dernières années ont connu un fort regain d'intérêt pour le phénomène parce qu'en dissociant perception et stimulation physique, il apparaît comme un outil idéal pour comprendre les corrélats neuronaux de la perception, ou de la conscience (Block, 2005; Crick & Koch, 1998).

Dans cette thèse, j'utilise la bistabilité comme un outil pour comprendre certains mécanismes de la perception visuelle comme les calculs probabilistes d'utilité, l'adaptation ou la manière de prédire le prochain percept. Etant le paradigme central à toutes les expériences, nous allons maintenant exposer en détails les éléments clés de la littérature pour comprendre le phénomène de bistabilité.

CHAPITRE 2 : PARTIE THEORIQUE – INTRODUCTION AUX MECANISMES DE LA PERCEPTION BISTABLE

I. Propriétés de la perception bistable

La bistabilité a été définie comme irrépressible, exclusive et aléatoire.

I.A Les principales propriétés définissant la bistabilité

La bistabilité est une alternance entre percepts tandis que la stimulation physique reste fixe pendant une présentation continue du stimulus. Comprendre la bistabilité de manière complète nécessite d'abord d'appréhender correctement ses différentes étapes qui pourraient être de (Blake & Logothetis, 2002) : (1) décider que le stimulus est ambigu ; (2) sélectionner le premier percept ; (3) supprimer les autres percepts ; (4) décider quand alterner entre les percepts.

Leopold et Logothetis ont essayé (1999) d'isoler les caractéristiques de la bistabilité qui sont retrouvées invariablement pour tous les stimuli bistables. Ils avancent que la bistabilité est définie par son caractère irrépressible, que les percepts bistables sont caractérisés par leur exclusivité et que les alternances entre percepts (appelées aussi *renversements*) sont définies par leur caractère aléatoire. Le caractère irrépressible de la bistabilité signifie que son apparition ne peut être empêchée. L'exclusivité des percepts est le fait que les interprétations possibles du stimulus ne peuvent être perçues simultanément. Le caractère aléatoire des renversements est établi parce que la plupart des chercheurs ont échoué à prédire le moment des renversements bistables. Ils ont ainsi tenté de corrélérer la durée d'une phase avec la durée de la suivante mais une indépendance des durées de phase (Figure 4) est systématiquement rapportée (Blake, Fox, & McIntyre, 1971; Fox & Herrmann, 1967; Pressnitzer & Hupé, 2005; Taylor & Aldridge, 1974; Walker, 1975a).

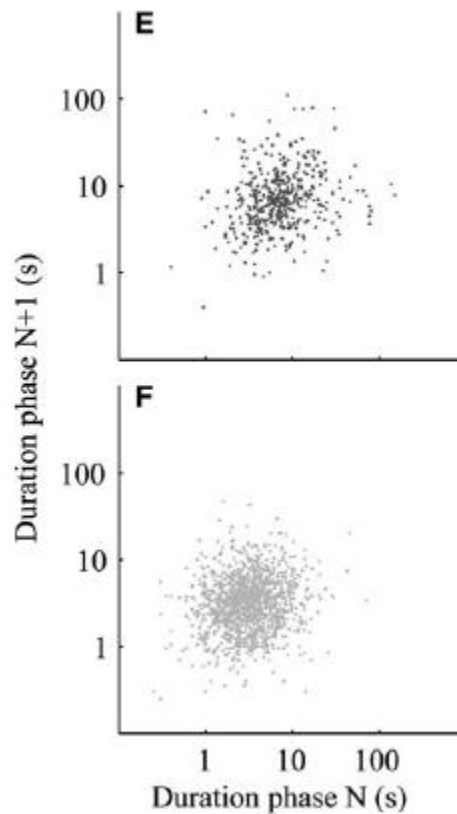


Figure 4 : Indépendance des durées de phases successives en bistabilité auditive (E) et en rivalité de plaids (F) : durée de la phase N comparée à la durée de la phase N+1. Une corrélation inverse est attendue. Figure issue de Pressnitzer et Hupé (2006).

I.B Réévaluation des propriétés établies et nouvelles propriétés

Je vais maintenant discuter tour à tour la pertinence des propriétés évoquées puis en ajouter de nouvelles.

I.B.1 Caractère irrépressible

Le caractère irrépressible est bien systématique dans la bistabilité : il est possible de volontairement empêcher la bistabilité de manière partielle mais pas complète. Le caractère irrépressible est dépendant de la connaissance qu'ont les observateurs de l'existence des différentes interprétations du stimulus ambigu. La présentation continue n'est par contre pas strictement nécessaire pour obtenir de la bistabilité.

Il existe trois phénomènes qui vont partiellement à l'encontre du caractère irrépessible de la bistabilité. Le premier phénomène est qu'il est possible de contrôler volontairement son percept, dans une certaine mesure. Les expériences le montrant sont décrites en section III.B ; néanmoins, les résultats indiquent qu'il est impossible d'empêcher complètement la bistabilité, signant son caractère irrépessible.

Le second phénomène est la présentation intermittente (cf. IV.H.3) : lorsque la présentation du stimulus est interrompue à un certain rythme spécifique (Leopold, Wilke, Maier, & Logothetis, 2002), les renversements n'ont plus lieu. Néanmoins, sur un nombre de présentations intermittentes suffisamment grand (et relativement constant: Brascamp, Pearson, Blake, & van den Berg, 2009), les renversements ont toujours lieu. Une autre lecture du phénomène (lorsque l'interruption est courte, les renversements ont lieu à chaque présentation) est que la bistabilité a lieu malgré une présentation intermittente, lorsque la présentation se fait à un certain rythme. La présentation continue n'est donc pas une condition nécessaire du phénomène bistable.

Le troisième phénomène a lieu lorsque les observateurs ne sont pas informés des différentes interprétations que le stimulus pourrait générer. On observe alors une absence complète de renversement chez 35% des observateurs après 3 min de présentation continue (Girgus et al., 1977) et de 50% à 70% après 1 min (Rock & Mitchener, 1992). Il a été possible de tester le phénomène avec le vase de Rubin, la pyramide-couloir et la carte pliée. Les auteurs concluent à un rôle de l'intention⁵ dans le renversement. La proportion d'absence de renversement est plus importante lorsqu'on diminue le niveau d'éducation des observateurs, ce qui suggère que cette proportion est dépendante de la probabilité d'exposition au stimulus⁶ (Rock & Mitchener, 1992). La prédiction est donc que les enfants auront une proportion d'absence de renversement très élevée. Une étude rapporte que les enfants non-informés de 3 à 4 ans ne renversent pas du tout (Rock, Gopnik, & Hall, 1994) tandis que les enfants non-informés de 5 à 10 ans renversent dans 35% des cas (Mitroff, Sobel, & Gopnik, 2006). Pourtant, même informés, les enfants de 3-4 ans ont un taux de renversement inférieur à 1 par minute⁷. La variable confondante pourrait être ici le lien entre renversements et intelligence : plus celle-ci est mesurée élevée, plus le taux de renversement est fort (Crain, 1961; Hodges & Fox, 1965). Par ailleurs, il a été rapporté qu'un sous-groupe

⁵ L'intention (de renverser) peut être ici rapprochée du contrôle volontaire (cf. III.B).

⁶ Par stimulus ici, nous entendons l'exposition à la version ambiguë et la reconnaissance des différentes interprétations possibles car l'exposition aux interprétations non-ambigües seules n'a pas d'effet (Rock, Hall, & Davis, 1994).

⁷ Après 5 ans, les taux de renversement restent bas puis remontent doucement avec l'âge (Fagard et al., 2008).

d'observateurs (20%) n'est pas capable de percevoir le stimulus du mouvement biologique ambigu comme un marcheur s'éloignant plutôt que se rapprochant (Wang & Jiang, 2011). Néanmoins, même lorsque la stéréoscopie est utilisée comme désambiguïsation, ce sous-groupe échoue à percevoir le marcheur correctement : il peut donc s'agir d'une incapacité sans lien avec la bistabilité.

I.B.2 Exclusivité des percepts

L'exclusivité des percepts existe pour les figures ambiguës. Pour la rivalité binoculaire par contre, trois phénomènes (premier percept mixte, patchworks des grands stimuli et ondes de transition) montrent que l'exclusivité ne s'applique que localement.

Bien que présente pour les figures ambiguës, l'exclusivité des percepts n'existe pas pour les rivalités binoculaire et monoculaire. En rivalité binoculaire, les observateurs commencent en effet par percevoir les deux interprétations superposées (un phénomène appelé *fusion anormale*). Ce percept mixte ne dure que 150 ms (Wolfe, 1983). Puis viennent les percepts suivants, qui ne sont presque jamais entiers lorsque le stimulus est plus grand qu'un degré d'angle visuel (Blake, 1989; Lehky, 1995; Levelt, 1965; Meenes, 1930). Les observateurs perçoivent un patchwork composé de parties des deux images présentées à chaque œil, pouvant conduire à des groupements interoculaires (cf. II.A.1) et à une multi-stabilité (Suzuki & Grabowecky, 2002).

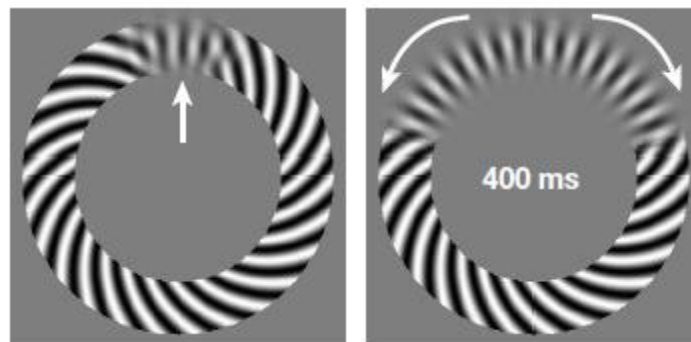


Figure 5 : Ondes de propagation du renversement entre un anneau en spirale et un anneau à rayons. Figure issue de Wilson, Blake et Lee (2001).

Enfin, il a été montré que les alternances de la rivalité binoculaire se font progressivement, sous la forme d'onde (Wilson, Blake, & Lee, 2001), même lorsque le stimulus est plus petit qu'un degré d'angle visuel. L'observateur perçoit l'une des images complètement puis l'image de l'autre œil apparaît à un point précis. A partir de ce point, l'image va se diffuser de proche en proche, à la manière d'une vague, jusqu'à être vue en tout point du stimulus. Ce phénomène suggère que la rivalité est issue d'une série d'unités de compétition locale dont les résultats influencent les

compétitions des unités adjacentes⁸. L'équipe de Blake a pu montrer que la taille de ces unités ne dépassait pas 0.1° (Blake, O'Shea, & Mueller, 1992). L'exclusivité est donc respectée pour la rivalité binoculaire, mais seulement au sein de chaque unité locale. C'est un argument en faveur d'une compétition de bas niveau dans la rivalité, qui aurait lieu dans une zone corticale rétinotopique (Blake, 1989).

I.B.3 Caractère aléatoire des renversements

La durée de la phase N dépend légèrement de la durée de la phase N-1 mais pas des précédentes. Les renversements ont lieu de manière stochastique, non-chaotique.

Une étude récente (van Ee, 2009) s'est focalisée sur les fonctions d'auto-corrélation trouvées dans la littérature. L'auto-corrélation consiste simplement à exprimer la corrélation entre la durée de la phase N et de la durée de la phase $N+k$ (k est le pas) en fonction du pas. Or, pour un pas de 1, la corrélation est systématiquement positive (mais faiblement, Figure 6). L'étude conclut à un effet de l'adaptation alors qu'une corrélation négative serait attendue dans ce cas. L'auteur pense que l'ajout de bruit dans le phénomène d'adaptation permet d'obtenir cette corrélation positive. Pourtant, en ajoutant le bruit ailleurs, il obtient aussi des corrélations positives significatives⁹. Le bruit a tout de même un rôle dans le processus de renversement (cf. I.C.4).

La caractéristique dynamique principale de la bistabilité semble donc être l'imprédictibilité du moment des renversements. Cette imprédictibilité ne signe pourtant pas le caractère aléatoire puisque les systèmes chaotiques paraissent imprédictibles et sont pourtant déterministes. En utilisant deux méthodes raffinées, Lehky (1995) n'a pas trouvé de relation déterministe. L'une d'elle consiste à séparer les données en deux moitiés et à tenter de prédire la durée de phase dans la seconde moitié à partir de la durée de phase dans la première moitié. Puis l'on prend chaque séquence de n durées de phases en bloc 2 et on isole dans le bloc 1 les k séquences les plus similaires. La phase suivante est estimée par la moyenne des phases suivantes dans les séquences isolées. Les résultats sont comparés avec des données aléatoires. Alors que ce procédé fonctionne très bien pour trouver les systèmes chaotiques physiques, il ne découvre ici rien de chaotique.

La rivalité binoculaire ne serait donc pas un système chaotique mais stochastique (malheureusement, aucune étude n'a tenté l'utilisation de cette méthode pour les figures

⁸ Cette idée est similaire au point de vue développé par Whittle (Whittle, 1965; d'après Blake, 2005).

⁹ Page 2617, colonne 2, paragraphe 2 : « The largest lag 1 correlation that we were able to produce only marginally exceeded the 95% confidence boundary (dashed line in Fig. 6(b)). »

ambigües). Le caractère stochastique des renversements a longtemps poussé les chercheurs à décrire les phases par leurs statistiques moyennes, comme la forme de leur distribution.



Figure 6 : Auto-corrélations obtenues pour un pas de 1 dans différents travaux en rivalité binoculaire (a) ou avec des figures ambiguës (b), en présentation passive ou attentive (l'observateur doit maintenir un percept). Elles sont toutes positives. Plus le contrôle attentionnel est fort, moins la corrélation est forte (c), ce qui est interprété comme une diminution du bruit dans l'adaptation par l'attention selon l'auteur. Figure issue de van Ee (2009).

I.B.4 Distribution des phases bistables

Les durées de phases suivent une loi log-normale ou les taux de renversement suivent une loi gamma.

Lorsque la distribution des durées de phase est examinée, une nouvelle propriété est révélée : une distribution gamma des phases est d'abord systématiquement trouvée (Figure 7), quel que soit le phénomène bistable (Kovacs, Papathomas, Yang, & Feher, 1996; Levelt, 1967; Logothetis, Leopold, & Sheinberg, 1996; Walker, 1975a). Elle s'est avérée longtemps meilleure que d'autres distributions (de Marco et al., 1977) jusqu'à ce que de nouvelles distributions soient testées comme la distribution log-normale (Hupé & Rubin, 2003; Lehky, 1988, 1995; Murata, Matsui, Miyauchi, Kakita, & Yanagida, 2003; Pressnitzer & Hupé, 2005). Une distribution log-normale revient à une distribution normale sur un espace qui ne peut être négatif, ici les temps. La distribution log-normale est parfois la seule qui convienne pour le cube de Necker, la sphère en rotation ou la rivalité d'orientation (Zhou, Gao, White, Merk, & Yao, 2004). Finalement, ajuster les données à partir de la distribution des taux de renversement (i.e. 1/phase) donne de meilleurs résultats qu'à partir de la distribution des durées de phases (Brascamp, van Ee, Pestman, & van den Berg, 2005). Autrement dit, c'est la distribution des taux de renversement qui suit une distribution gamma.

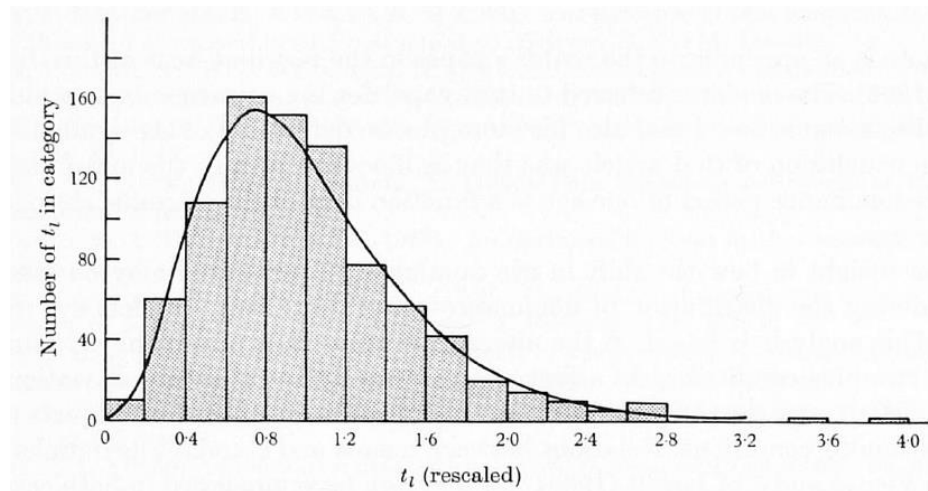


Figure 7 : Histogramme de la distribution des durées de phases ajustée par une fonction gamma. Figure issue de Levelt (1967).

I.B.5 Différents régimes de bistabilité

La préférence évolue au cours d'un épisode bistable en passant d'un régime biaisé à un régime stationnaire.

Bien qu'intéressant, les indices moyens de la dynamique de la bistabilité (comme la distribution des durées de phase) cachent en fait une propriété plus subtile de la dynamique bistable. Une étude de l'évolution de la dynamique au cours d'un épisode bistable (Mamassian & Goutcher, 2005) indique que la rivalité binoculaire connaît deux phases : elle passe d'un régime initial biaisé à un régime stationnaire. Pendant le régime initial, la probabilité de percevoir une interprétation est toujours plus extrême que pendant la phase stationnaire, pendant laquelle cette probabilité se rapproche asymptotiquement vers une valeur finale, plus près de 0.5. De même, la probabilité de renverser est toujours plus faible au début d'une présentation puis augmente jusqu'à atteindre un palier en régime stationnaire. Cette propriété a amené les chercheurs à s'interroger sur les différences entre ces deux régimes, notamment sur la spécificité du premier percept.

I.B.6 Spécificité du premier percept

Le premier percept est différent des autres sur la base des durées de phases et de préférences initiales. Le choix du premier percept est bien décrit dans le cadre Bayésien.

(a) Durées de phase et rivalité d'apparition

Il a été avancé que le premier percept d'un épisode bistable est différent des percepts suivants (Hupé & Rubin, 2003). En effet, ce percept est plus long que les suivants en rivalité d'orientation et en audition bistable (Figure 8). Le premier percept en rivalité de plaids en

mouvement est très souvent le percept du plaid cohérent et il est aussi plus long que les percepts suivants (Hupé & Rubin, 2003). Une expérience (Carter & Cavanagh, 2007) trouve des préférences fortes, idiosyncrasiques et rétinotopiques en présentation intermittente. Les auteurs appellent *rivalité d'apparition* les processus qui pourraient être spécifiques à ce premier percept biaisé. Ces biais forts sur le premier percept ont été confirmés et étendus à la préférence oculaire pour la rivalité d'orientation, de mouvement et le stimulus visage/maison (Kalisvaart, Rampersad, & Goossens, 2011) tandis que très peu de biais a été retrouvé après plusieurs percepts. Ce résultat est très similaire au régime biaisé initial suivi du régime stationnaire (Mamassian & Goutcher, 2005) décrit plus haut, en section I.B.5.

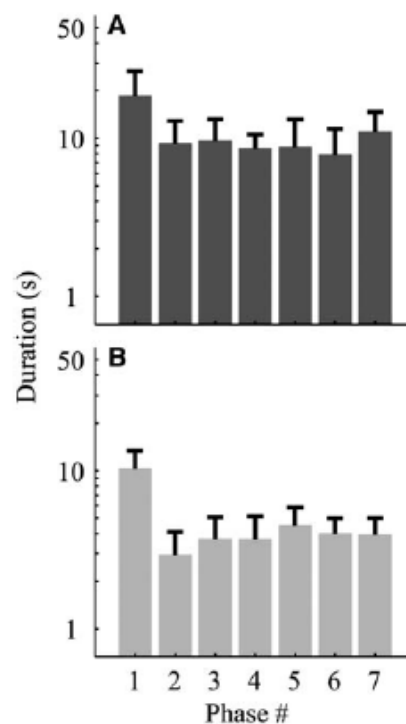


Figure 8 : Durée plus longue du premier percept en bistabilité de flux auditif (A) et en rivalité de plaids (B). Figure issue de Pressnitzer et Hupé (2006).

(b) Inférence Bayésienne

On peut en partie rendre compte de la perception du premier percept bistable grâce au cadre Bayésien (van Ee, Adams, & Mamassian, 2003; Mamassian & Landy, 1998). Après l'estimation des probabilités *a posteriori* (cf. Boîte 1), il existe plusieurs règles possibles sur la manière de choisir une première interprétation. Le système peut par exemple choisir le *maximum a posteriori (MAP)*. Une autre possibilité est d'appliquer une règle de correspondance des probabilités, c'est-à-dire que la probabilité qu'une interprétation soit perçue correspond à sa probabilité *a posteriori*. Cette règle n'est pas optimale, excepté si l'on prend en compte le fait que le monde change (Gepshtein & Kubovy, 2005). Néanmoins, la cause d'une même image est stable. Mamassian et

Landy (1998) utilisent cette règle dans une expérience qui teste la manière dont les surfaces sont construites. Les stimuli utilisés étant bistables (ils pouvaient être interprétés comme concave ou convexe). Les auteurs trouvent que la probabilité d'une réponse sur le premier percept (par exemple *concave*) correspond à la probabilité *a posteriori* de l'interprétation (*concave*). L'application à la rivalité se fait en posant l'hypothèse que le système perceptif tente de déterminer la scène qui a généré les images des deux yeux (Hohwy, Roepstorff, & Friston, 2008). Une autre règle possible est de sélectionner les pics de la distribution *a posteriori* : l'existence de deux pics signifie alors bistabilité. Des résultats concordants sont obtenus pour la rivalité d'inclinaison (van Ee et al., 2003). L'extension aux percepts suivants est plus complexe et nécessite de décider de la dynamique de l'inférence (Sundareswara & Schrater, 2008)¹⁰.

Boîte 1 : Introduction au cadre général de l'inférence Bayésienne

L'inférence Bayésienne est d'abord basée sur le calcul d'une distribution *a posteriori* d'une variable à estimer, qui représente la probabilité des différentes possibilités de cette variable, étant donnée une image. Dans un premier temps, une distribution de probabilités de la variable à estimer, la *vraisemblance*, est calculée à partir des règles de projection (par exemple) : elle correspond à la probabilité d'obtenir cette image pour chaque valeur de la variable. Il existe enfin une distribution *a priori* de la variable qui représente les connaissances du système, c'est-à-dire à quel point une valeur de la variable est probable dans le monde. La distribution *a posteriori* est obtenue en multipliant la vraisemblance par la distribution *a priori*. Dans une expérience contrôlée, les expérimentateurs peuvent ainsi calculer comment un observateur idéal se comporterait. Il a été montré à plusieurs reprises que le système visuel se comportait dans certaines conditions comme un système Bayésien idéal (Kersten, Mamassian, & Yuille, 2004; Mamassian, 2006; Mamassian, Landy, & Maloney, 2002), de même que le système d'apprentissage sensori-moteur (Kording & Wolpert, 2004).

¹⁰ Cf. section II.G pour plus de détails sur le modèle de Sundareswara et Schrater (2008).

I.B.7 Loi du Partage Complémentaire et force d'un stimulus

La force d'un stimulus en rivalité binoculaire est déterminée par son contraste.

En étudiant la rivalité binoculaire, Levelt a posé les premières bases de la compréhension du phénomène bistable au travers de plusieurs concepts. Lorsqu'un cercle sombre dans un œil est opposé à un fond blanc dans l'autre œil (Levelt, 1965), le cercle sombre est vu sans discontinuité (fusion, Figure 9A). Pourtant, quand le même fond blanc dans l'autre œil est délimité par un contour, la fusion donne beaucoup plus de poids à ce fond blanc (Figure 9C)¹¹. La luminosité binoculaire serait traitée selon la *loi du Partage Complémentaire*. La luminosité binoculaire perçue est la moyenne des énergies lumineuses monoculaires, la présence d'un contour dans un œil augmentant simplement localement le poids attribué à cet œil.

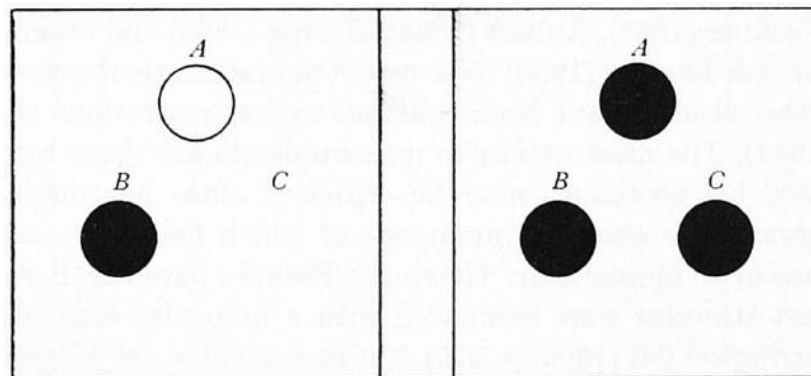


Figure 9 : En fusion libre croisée des deux panneaux, B n'apparaît pas différent de C. Pourtant, C est monoculaire. Quand la partie blanche de C est délimitée par un contour comme en A, la luminosité perçue est beaucoup plus forte : le contour donne du poids à l'œil. Figure issue de Levelt (1965).

La rivalité apparaît quand des contours différents sont présents dans les deux yeux. Dans ce cas, les poids attribués à chaque œil augmentent de manière à ce que leur somme dépasse 1 (Levelt, 1966). Or, cette somme ne doit pas dépasser 1. La pondération va donc s'effectuer dans le temps, par la création de phases alternantes (rivalité) dont la durée dépend de ces poids. Néanmoins, une prédiction de cette théorie est que la rivalité est présente même quand les contours correspondent entre les yeux (somme des poids supérieure à 1), ce qui s'avère incorrect (Blake & Boothroyd, 1985). Le poids est aussi appelé *force du stimulus*. Plus largement, la force du stimulus correspond à

¹¹ On peut en fait remarquer que le cercle A est en rivalité. De plus, le percept issu de C contient étrangement une profondeur stéréoscopique.

une dimension pertinente pour désambigüiser le stimulus mais qui ne provoque pas en soi de bistabilité. En rivalité, il peut s'agir du contraste car les différences interoculaires de contraste ne génèrent pas en soi de rivalité. Le quadruplet de points est ambigu sur la direction du mouvement : la force du stimulus peut correspondre à l'élongation de la configuration. Une élongation forte favorise une interprétation mais l'élongation en elle-même n'est pas source de bistabilité. Une des dimensions qui peut être considérée comme la force du stimulus « sphère en rotation » est la luminance des points se déplaçant dans une direction (Klink, van Ee, & van Wezel, 2008), et pour la force de la rivalité de plaids en mouvement, l'angle entre les réseaux ou leur différence de longueur d'onde (Moreno-Bote, Shpiro, Rinzel, & Rubin, 2010).

I.B.8 Principes de Levelt

D'après le second principe de Levelt amélioré, lorsque la force d'une interprétation est modifiée, la durée de phase affectée est principalement celle de l'interprétation dont la force est la plus grande.

Levelt a énoncé quatre principes (Levelt, 1966), le plus influent étant le second. Selon le premier principe, la dominance d'un stimulus augmente avec sa force. La relation entre force du stimulus et durée de phase est subtile : d'après le second principe de Levelt, augmenter la force dans l'œil gauche diminue principalement la durée de la phase de l'œil droit (tandis que celle de l'œil gauche reste quasi-constante). Le taux de renversement augmente donc en conséquence (principe III). Le second principe a été vérifié et étendu à d'autres figures ambiguës (Klink, van Ee, & van Wezel, 2008; Mamassian & Goutcher, 2005). Des violations du principe ont aussi été trouvées (Brascamp, van Ee, Noest, Jacobs, & van den Berg, 2006). Par exemple, lorsque l'on considère une série de percepts « image de l'œil gauche » / mixte / « image de l'œil gauche » comme une phase unique en faveur de l'image de l'œil gauche (Mueller & Blake, 1989), la durée des phases de l'œil dont on varie le contraste augmente. Les violations (Bossink, Stalmeier, & de Weert, 1993) sont trouvées lorsque les stimuli sont petits ($<1.3^\circ$) et cela n'est pas dû à l'imprécision de la tâche de report de bistabilité avec les grands stimuli (qui sont presque toujours mixtes) mais plutôt à la plus grande fréquence de renversement dans ce cas (Kang, 2009). Bien-sûr, la dominance ne suit pas le second principe car les dominances des deux percepts doivent s'additionner à 1 (elle augmente avec le contraste ipsilatéral et diminue avec le contraste contra, tout comme les durées de phases pour les stimuli petits). Le principe doit alors être reformulé de manière plus précise en le séparant en deux parties:

- (1) Pour les stimuli petits, la force du stimulus affecte principalement la durée de phase de l'œil dont l'image a la plus grande force (Brascamp et al., 2006).

(2) Pour les grands stimuli, la force du stimulus affecte la durée de phase de l'œil contralatéral (Kang, 2009). Meng et Tong (2004) trouve cependant l'inverse avec de grands stimuli complexes (type visage et maison).

Bien qu'énigmatique au premier abord, la version originale du second principe est facilement modélisable à l'aide d'adaptation et d'une suppression réciproque entre deux neurones (Kalarickal & Marshall, 2000). Finalement, augmenter le contraste des images des deux yeux diminue les deux phases, augmentant le rythme des renversements sans changer la dominance (principe IV, répliqué par van Ee, 2009). Ce principe, décrit le premier par Breese (1899), a été un élément en faveur d'une nouvelle propriété : une indépendance entre renversement et suppression.

I.B.9 Indépendance entre mécanismes de renversement et de suppression

Il existe deux mécanismes distincts : l'un pour le maintien¹², l'autre pour le renversement.

Les processus en jeu pendant un renversement sont différents de ceux en jeu lorsqu'un stimulus est dominant (Blake & Logothetis, 2002). Deux autres études montrent ainsi que le contexte¹³ peut maintenir la prédominance de l'œil congruent mais qu'il ne peut délivrer l'autre œil de la suppression par un renversement (Alais & Blake, 1999; Sobel & Blake, 2002b). Les phases du percept congruent sont en effet augmentées tandis que celles de l'autre percept restent inchangées. Le mécanisme d'organisation perceptive n'agit donc que sur le mécanisme de la sélection¹² et pas sur celui qui provoque le renversement : les deux sont bien distincts. Les expériences impliquent une distance minimum entre le contexte et l'élément considéré (cible) : par exemple, dans Sobel et Blake (2002b), le stimulus du diamant est utilisé. Le diamant ne peut être perçu que lorsque les quatre ouvertures sont visibles. L'une des ouvertures est mise en rivalité avec un échiquier et l'échiquier est alors perçu moins fréquemment. Lorsqu'il n'y a pas de distance entre le contexte et la cible (comme dans le stimulus présenté en Figure 10), un effet inverse du contexte est trouvé (Carter, Campbell, Liu, & Wallis, 2004). L'image de l'œil non-congruent est maintenue par le contexte (mais toujours pas délivrée de la suppression). Cet effet contre-intuitif pourrait s'expliquer si l'on tient compte du contour illusoire créé quand les orientations sont adjacentes et orthogonales (contexte non-congruent) entre le fond et le réseau, et qui renforce le contour réel. La

¹² Notez bien que ce qui est valable pour la sélection (le maintien, la dominance) s'applique réciproquement à la suppression associée.

¹³ Ici, *contexte* a une signification impliquant le groupement d'éléments locaux en une forme globale (suivant par exemple les règles de la Gestalt).

création de ce contour illusoire est supposée augmenter la luminosité perçue du réseau (Dresp, Lorenceau, & Bonnet, 1990) et donc augmenter sa dominance.

Exploitant l'idée des deux mécanismes distincts pour dominance et renversement, une étude (Brascamp et al., 2005) teste un modèle bistable appelé beta'. Ce modèle implique une compétition entre un processus qui décide que le percept doit être maintenu et un processus qui décide qu'il doit y avoir renversement. Le modèle est directement inspiré d'un modèle de saccades en recherche visuelle qui donne aussi une distribution gamma (van den Berg & van Loon, 2005) : il implique une compétition entre un processus qui décide que la fixation courante est une cible et un processus qui décide qu'un objet en dehors de la fixation pourrait être une cible¹⁴. Cependant, la distribution beta' des taux de renversement s'est avérée un peu moins bonne que la distribution gamma pour ajuster les données en rivalités d'orientation et visage-maison et pour le cube de Necker, mais pas pour la rivalité d'inclinaison.

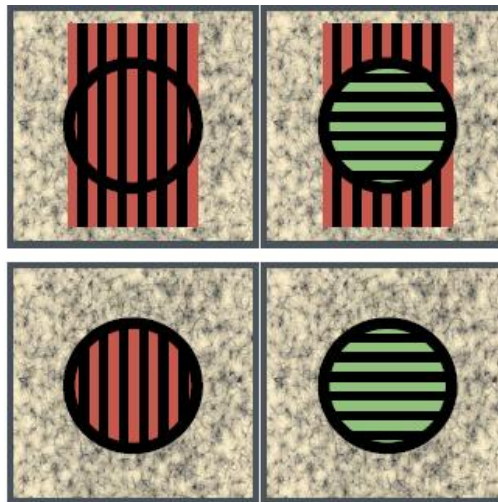


Figure 10 : Effet du contexte. Les deux panneaux de gauche sont présentés à l'œil gauche et les autres à l'œil droit. Sur la ligne du haut, le contexte est censé favoriser l'œil gauche. La ligne du bas est la condition contrôlée. Figure issue de Blake et Logothetis (2002).

I.C Causes possibles des renversements

Les renversements ont été attribués successivement (Long & Olzweski, 1999; Walker, 1978a) à des mécanismes passifs comme les variations d'accommodation, la contraction de la pupille, l'adaptation, le bruit (processus purement aléatoire) ou un oscillateur sous-cortical. Ils ont été aussi attribués à des causes actives comme les coupures attentionnelles, les saccades, les actions motrices ou un mécanisme d'exploration des possibles. Même si l'adaptation et l'attention sont les explications

¹⁴ Il s'agit donc d'un modèle de course (*race model*) entre des signaux « go » et « no go ».

favorisées des renversements en rivalité binoculaire, il est difficile de les généraliser à tous les stimuli bistables.

I.C.1 Variations d'accommodation

L'accommodation ne provoque pas les renversements.

Il a été proposé que les renversements ont lieu par l'intermédiaire du contrôle volontaire, qui peut utiliser les variations d'accommodation comme un moyen de renverser. Pourtant, la paralysie des muscles adaptateurs ne change pas la capacité de contrôle du rythme des renversements (Lack, 1971).

I.C.2 Rôle de la pupille

La contraction de la pupille ne provoque pas les renversements.

Dans les années 60, Lowe et Ogle (1966) mesurent la rivalité entre un objet sombre et un objet clair. Ils trouvent que la pupille se contracte légèrement lorsque l'objet clair est perçu consciemment, ce qui est confirmé plus tard (Richards, 1966). Ces données suggèrent que les modifications de la pupille pourraient avoir un rôle causal dans le renversement bistable. Récemment, une équipe (Einhäuser, Stout, Koch, & Carter, 2008a) a trouvé que la pupille se contractait 300 ms avant la réponse signalant un renversement (indépendamment ici, de la luminosité du stimulus et avec quatre stimuli différents, cf. Figure 12). Surtout, l'amplitude de la contraction est corrélée avec la durée du percept bistable suivant (Figure 11). Quelques critiques peuvent être faites sur cette étude :

- Au moment où la pupille se contracte, le taux de clignement des yeux et le taux de saccade diminuent fortement (même étude). Cela suggère que le système périphérique est prévenu un peu avant le renversement afin qu'il se mette en condition pour recevoir une nouvelle information (la contraction suggère par contre que le système de contrôle de la pupille n'est pas informé de la quantité de lumière attendue après le renversement).
- La faible corrélation ($|r|$ maximum = 0.13) entre amplitude de contraction et durée de phase a pu être répliquée mais son caractère prédictif est contesté (Einhäuser, Stout, Koch, & Carter, 2008b; Hupé, Lamirel, & Lorenceau, 2008; Lamirel, Hupé, & Lorenceau, 2008).

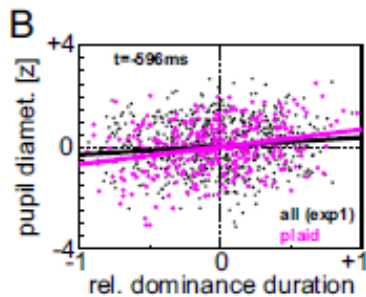


Figure 11 : Graphe de corrélation entre le diamètre de la pupille et la durée de la phase suivante. Figure issue d'Einhäuser, Stout, Koch, & Carter (2008a).

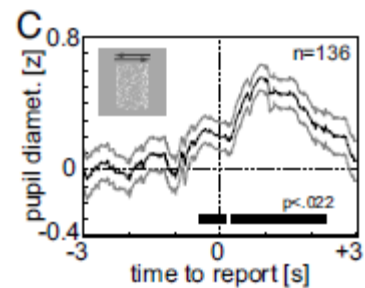


Figure 12 : Diamètre de la pupille en fonction du moment rapporté du renversement (pour le cylindre en rotation). Figure issue d'Einhäuser, Stout, Koch, & Carter (2008a).

Nous avons vu que le contrôle volontaire ne s'effectuait pas par l'intermédiaire du contrôle de l'accommodation. En utilisant une pupille artificielle sans abolir le contrôle volontaire, Lack (1971) montre aussi que le changement du diamètre de la pupille est une conséquence des renversements plutôt qu'une cause.

I.C.3 Adaptation

L'adaptation est la principale explication des renversements.

Depuis une très longue période et jusqu'à maintenant, l'adaptation est l'explication privilégiée des renversements. Il est possible d'envisager une période de dominance comme l'inhibition réussie d'une représentation par une autre représentation en compétition. La représentation dominante peut s'adapter et provoquer la libération de la représentation supprimée (tandis que l'adaptation de la représentation supprimée se dissipe). J'aborde cette question très spécifiquement en section IV.G.3. Cette libération peut avoir lieu par le biais de la fatigue neuronale (Köhler & Wallach, 1944; Spitz & Lipman, 1962). Je développe complètement en partie IV les raisons pour lesquelles l'adaptation vue comme une fatigue neuronale est un concept incorrect. D'autres alternatives sont possibles et peuvent rendre compte tout aussi bien des renversements (e.g., l'adaptation comme recalibrage).

Dans certains modèles Bayésiens (Hohwy et al., 2008), l'adaptation est proposée en pratique comme équivalente à une hypothèse selon laquelle le monde doit changer. Cette hypothèse n'est pas très réaliste puisque le monde visuel est stable : lorsque le système visuel attribue un événement visuel à une cause dans le monde, et que le même événement visuel est continuellement observé, il est peu probable que la cause ait changée.

I.C.4 Bruit

Le rôle du bruit dans la genèse des renversements n'est pas établi.

Nous avons vu les arguments avancés en faveur d'un processus stochastique créant les renversements (cf. I.B.3), qui nous a amené à considérer la distribution des durées de phases. Levelt (1967) interprète la distribution gamma des phases qu'il observe comme reflétant l'attente de k impulsions indépendantes et suivant une loi aléatoire de Poisson. A partir de la distribution, il calcule $k = 4$, ce qui signifie qu'il faut attendre 4 de ces impulsions pour obtenir un renversement. Levelt constate aussi son ignorance sur ce que représentent ces 4 impulsions discrètes¹⁵ dans le système nerveux et personne n'a pu en donner une interprétation plus profonde pour l'instant.

Une expérience (Brascamp et al., 2006) étudie les transitions entre percepts. Elle révèle que ces transitions sont en fait longues et fréquemment incomplètes. Un rôle prépondérant du bruit permettrait de rendre compte de ces deux phénomènes (Figure 13). Remarquez que même si le bruit joue un rôle, il s'agit tout de même d'une hypothèse d'adaptation comme cause des renversements : il n'y a pas de renversement ici sans adaptation¹⁶.

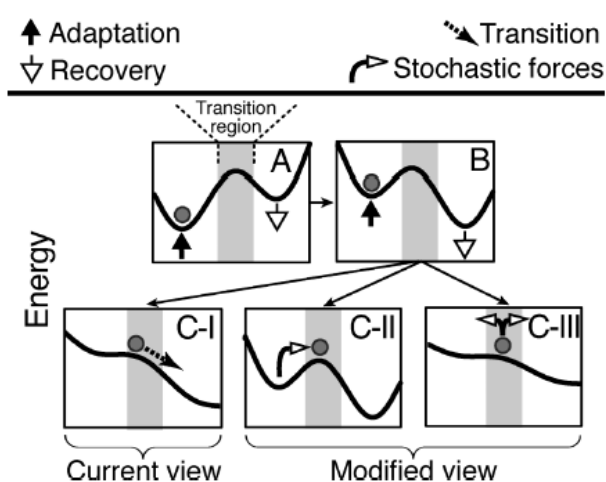


Figure 13 : Rôle du bruit. A : Dans un paysage d'énergie, l'état perceptif peut être représenté par une balle. Lorsqu'elle est dans un creux, l'état est stable. B : Adaptation et dissipation de l'adaptation modifient le paysage. C-I : Lorsque celui-ci n'est plus qu'une pente, le système glisse

¹⁵ Etant donné la dynamique des potentiels d'action post-synaptiques, il est très peu probable qu'ils correspondent à ces impulsions discrètes. Levelt suggère une liaison avec les mouvements oculaires mais le paramètre reste à 4 lorsque l'image est immobilisée sur la rétine grâce à un effet consécutif (Blake, Fox, & McIntyre, 1971).

¹⁶ Cf (Moreno-Bote, Rinzel, & Rubin, 2007) pour une théorie purement basée sur le bruit.

rapidement vers un autre état perceptif (pensée actuelle). C-II et III : Lorsque du bruit est ajouté, la balle peut être poussée en haut de la colline avant la modification du paysage, et se stabiliser dans une transition ou revenir dans le creux. Figure issue de Brascamp et al. (2006).

I.C.5 Oscillateur sous-cortical

Les données sur cette hypothèse sont incomplètes.

Pettigrew (2001) développe une hypothèse très différente pour l'origine des renversements : selon lui, la rivalité découle d'une activation de régions hémisphériques homologues par le biais d'un oscillateur dans le tegmentum ventral median. Cette région présente des neurones dont le rythme est de même fréquence que les alternances bistables. Pettigrew a de nombreux arguments en faveur de sa théorie (Carter & Pettigrew, 2003; Miller et al., 2000; Pettigrew, 2001; Pettigrew & Miller, 1998; Sheppard & Pettigrew, 2006). L'un des arguments contre cette théorie est que la rivalité n'est pas affectée par la coupure du corps calleux qui fait communiquer les deux hémisphères (O Shea, 2003). Il reste néanmoins à déterminer si les connexions sous-corticales inter-hémisphériques ne pourraient être utilisées à la place.

I.C.6 Coupures attentionnelles

Les coupures attentionnelles sont le principal concurrent à la théorie de l'adaptation.

Von Helmholtz (1911) fut le pionnier de la théorie selon laquelle les renversements en bistabilité sont provoqués par des coupures attentionnelles. Selon lui, le maintien de l'attention sur la tâche en cours ne peut être constant (cf. III.F) : le relâchement attentionnel provoque le renversement. Cette théorie a l'avantage de pouvoir rendre compte de phénomènes tels que les données sur la détection de cible en suppression (cf. II.B). Je développe complètement cette théorie en section III.B.

I.C.7 Saccades et mouvements oculaires

Les saccades et mouvements oculaires ne sont pas responsables des renversements.

Il a été montré que les saccades provoquaient automatiquement le report de l'attention à la position visée (Deubel & Schneider, 1996) et que le type d'attention était endogène (Jonikaitis, Paeppe, & Deubel, 2011). Puisque l'attention endogène influence les renversements (cf. III.D), il est naturel de penser que les saccades sont impliquées dans les renversements (Leopold & Logothetis, 1999).

Pour certains stimuli, l'endroit de fixation détermine la dominance de l'une ou l'autre des interprétations. C'est le cas du cube de Necker (Meng & Tong, 2004) : cela ne montre pas vraiment le rôle de la saccade mais celui de facteurs « bottom-up ».

En rivalité monoculaire, une intéressante théorie (Georgeson & Phillips, 1980) a été proposée selon laquelle la fixation entraîne une adaptation et un effet consécutif qui tend à faire disparaître les réseaux. Une saccade à une demi-phase dans le plan horizontal (ou vertical) ajoute l'effet consécutif au réseau vertical (ou horizontal), le faisant réapparaître de manière intense. Il existe principalement un argument contre cette théorie (Bradley & Schor, 1988) : la rivalité monoculaire a lieu avec des images consécutives comme stimulus, qui suivent donc la saccade et ne peuvent s'ajouter au réseau comme la théorie le requiert (Sindermann & Lüddeke, 1972).

En rivalité binoculaire, les renversements continuent lorsque la rivalité a lieu entre images consécutives (Blake et al., 1971; Blake, Yu, Lokey, & Norman, 1998; Lack, 1971) : la saccade ne change pourtant pas le stimulus dans ce cas.

Est-ce que le nystagmus optokinétique peut être impliqué ? En rivalité de transparence de mouvement, Watanabe (1999) a montré que les renversements ne sont pas stoppés par le contrôle volontaire, ce qui en fait un mécanisme pré-attentif. Au contraire, le nystagmus optokinétique suit la direction du mouvement de la surface (devant ou derrière) sur laquelle l'attention est portée. Il est donc plus probable que le nystagmus optokinétique soit une conséquence plutôt qu'une cause du renversement.

I.C.8 Influence motrice

Les données sur l'influence motrice sont contradictoires.

Il est possible que le sujet ne ré-estime pas en continu sa perception. Quand il note un changement, il déclenche une réponse motrice. L'action est alors incluse dans une boucle dont l'étape finale est la comparaison de la réponse donnée avec le percept en cours. L'acte pourrait influencer le percept par cette évaluation supplémentaire. La dynamique de la bistabilité peut donc être modifiée vers une augmentation du rythme d'évaluation du percept : plus le sujet alterne, plus il répond, plus il alterne. Les données de Mamassian et Goutcher (2005) confirment cette prédiction en rivalité d'orientation (une probabilité de renversement qui augmente selon une fonction exponentielle du temps de présentation) mais tous les auteurs ne trouvent pas cette augmentation des renversements. Certains trouvent une diminution sur un temps plus long, en rivalité d'orientation, de visage-maison, d'inclinaison et avec le cube de Necker, quelle que soit la condition de contrôle volontaire (van Ee, van Dam, & Brouwer, 2005). D'autres trouvent que la durée de

phase en rivalité binoculaire (orientation et couleur) augmente selon une fonction racine carrée du temps de présentation (Lehky, 1995), au contraire de la prédiction.

I.C.9 Exploration libre

Les données sur la théorie de l'exploration libre ne sont pas encore convaincantes mais la théorie reste une piste intéressante.

La bistabilité pourrait être le résultat d'un processus d'exploration libre des interprétations de la scène de la même manière que les saccades explorent la scène (Leopold et al., 2002). Ainsi, une distribution gamma des durées de saccades est aussi retrouvée en exploration libre. L'intérêt d'une telle exploration des possibilités peut être illustré en Figure 14 (consultez la figure avant de lire la suite). Si le système visuel restait figé sur sa première interprétation, le possesseur de ce système visuel pourrait être dévoré par un tigre. Il est aussi possible que le mécanisme qui cherche la meilleure interprétation du stimulus le fasse en continu car il n'est normalement jamais en contact avec un stimulus fixe (saccades, mouvements). Pourtant, les recherches sur la cécité au changement tendent à prouver l'inverse : on ne met pas à jour une interprétation s'il n'y a pas un signal (de mouvement local) préconisant l'actualisation (Levin & Simons, 1997; Rensink, O'Regan, & Clark, 1997; Simons, 2000; Simons & Levin, 1998; Simons & Rensink, 2005). Une autre possibilité serait que la fréquence d'actualisation de l'interprétation soit une fonction de la confiance dans cette interprétation.



Figure 14 : Illustration de l'intérêt d'explorer différentes interprétations d'une scène bien que celle-ci reste fixe (voir texte ci-dessus pour plus d'explications). Figure issue de Leopold et Logothetis (1999).

II. La rivalité binoculaire

II.A La hiérarchie des différentes rivalités

Plusieurs niveaux indépendants de compétition existent dans la rivalité : interoculaire, orientation, couleur ou mouvement. Le niveau interoculaire est prédominant.

Lorsqu'un attribut diffère entre les deux yeux, une fusion a tout de même lieu à condition que la différence reste faible : les attributs sont alors moyennés¹⁷. Lorsque cette différence augmente, le système peut finalement tomber en rivalité. Dans le Tableau 1, Blake (1989) résume les différences moyennes maximales qui permettent la fusion. Néanmoins, des différences plus grandes ne produisent pas forcément une rivalité : une exclusivité peut exister ou alors des informations contradictoires peuvent coexister dans différentes parties du système (accessible par certaines parties du système et pas par d'autres). Certaines grandeurs sont même immunisées contre la rivalité et produisent une fusion systématique (de type superposition, transparence ou moyenne), comme par exemple, les différences de contraste, de rythme de clignotement (O'Shea & Blake, 1986) ou de vitesse de déplacement (van De Grind, van Hof, van der Smagt, & Verstraten, 2001; en contradiction avec Blake, Zimba, & Williams, 1985). La littérature n'est pas claire sur la question de la rivalité de fréquence spatiale. Tandis que les observateurs de Blakemore (1970) la rapportent subjectivement, une étude plus récente (Yang, Rose, & Blake, 1992) rapporte une superposition (en transparence ou non).

¹⁷ La fusion faible (Ernst & Banks, 2002), par exemple, consiste à moyenner (entre modalités, souvent) en pondérant par le bruit de chaque mesure.

Tableau 1 : Les différences interoculaires maximales compatibles avec une fusion pour la fréquence spatiale^{18,20} , l'orientation¹⁹, la direction de mouvement et la vitesse²⁰. Tableau issu de Blake (1989).

Table 1
Maximum Disparity Yielding Binocular Single Vision for Various Stimulus Dimensions

Reference	Stimulus dimension	Maximum interocular difference
Blakemore (1970)	Spatial frequency	20% difference in cycles/degrees
Kertesz & Jones (1970)	Orientation	15 angular degrees
Braddick (1979)		
Wade, deWeert, & Swanson (1984)	Direction of motion	30 angular degrees
Blake, Zimba, & Williams (1985)		
Blake et al. (1985)	Velocity	50% difference in degrees per second
Hollins & Leung (1978)	Wave length	Varies with reference nanometer

Nous allons voir qu'il existe maintenant un consensus à propos de la rivalité binoculaire : la nature des stimuli utilisés en rivalité détermine le niveau de compétition (Blake & Logothetis, 2002). Il est probable que le niveau interoculaire soit toujours mis en jeu et que certains paradigmes recrutent une compétition additionnelle entre unités d'orientation, de couleur, de direction de mouvement ou d'objets (par exemple le visage-maison pourrait impliquer une compétition entre les unités codant pour les visages et celles codant pour les lieux). En théorie donc, la rivalité peut avoir lieu à plusieurs niveaux d'une hiérarchie de compétitions.

II.A.1 Rivalité interoculaire et entre orientations

Les deux types de compétition existent : interoculaire et entre orientations. La rivalité entre orientations est démontrée par les groupements interoculaires, la rivalité permutée et la rivalité monoculaire. La compétition interoculaire est montrée par le renversement après échange des images oculaires, la perception d'un plaid ou la détectabilité de cibles.

La théorie la plus influente en rivalité binoculaire fut celle de Blake (1989) selon laquelle la rivalité est une compétition locale entre neurones monoculaires orientés (*théorie interoculaire*, cf. II.G). Trois phénomènes ont permis d'attaquer la théorie interoculaire :

(1) D'abord, des *groupements interoculaires* (Figure 15) ont lieu, favorisant des formes continues, des objets (Diaz-Caneja, 1928; Kovacs et al., 1996; Suzuki & Grabowecky, 2002; Treisman, 1962; Whittle, Bloor, & Pocock, 1968). Le stimulus de Diaz-Caneja (U latéraux opposés

¹⁸ [30% est la valeur correcte (Blakemore, 1970)]

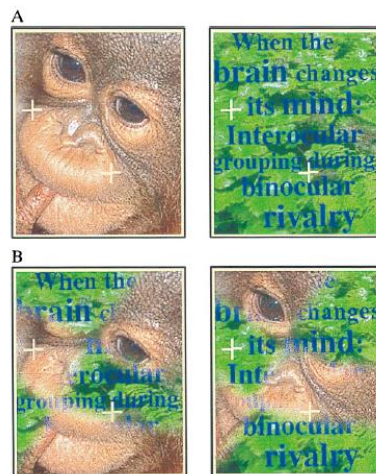
¹⁹ Une étude récente trouve des valeurs plus proches de 25° ou 30° (Buckthought, Kim, & Wilson, 2008).

²⁰ Cf. texte pour des données plus récentes démontrant l'immunité à la rivalité.

entre les yeux) est perçu la moitié du temps comme les images monoculaires et l'autre moitié comme un cercle ou des lignes horizontales, c'est-à-dire les patterns combinés entre les yeux (Ngo, Miller, Liu, & Pettigrew, 2000)²¹. En conclusion, un groupement par pattern (interoculaire) existe ainsi qu'un groupement oculaire.

(2) Ensuite, il existe la *rivalité permutée* (Logothetis et al., 1996) : lorsque les images monoculaires sont inter-changées 3 fois par seconde (en même temps qu'un clignotement à 18 Hz pour éviter les perturbations), les durées de phases sont peu affectées (2.7 s en rivalité normale contre 2.2 s en rivalité permutée). Pourtant, la théorie interoculaire prédit des durées de phases d'un tiers de seconde. Une étude plus récente (Lee & Blake, 1999) a montré que les phases étaient « normales » uniquement pour les caractéristiques de stimulus spécifiquement utilisées dans cette étude (contraste faible, fréquence temporelle autour de 1.5 Hz et fréquence spatiale haute). Pour des fréquences spatiales et temporelles plus basses ou un contraste plus fort, des phases très courtes sont rapportées.

(3) Finalement, il existe la *rivalité monoculaire*, qui recrute forcément un niveau de compétition entre orientations sans compétition interoculaire et qui semble pourtant très similaire à la rivalité d'orientation (Andrews & Purves, 1997). Toutefois, presque tous les stimuli de rivalité monoculaire comprennent aussi une compétition entre couleurs (l'étude de (O'Shea, Parker, La Rooy, & Alais, 2009) montre qu'elle existe aussi sans la couleur mais l'expérience n'utilise pas de stimuli orientés).



²¹ Il existe un bémol à propos de cette expérience : aussi bien l'image monoculaire que le pattern recombinaison interoculaire font appel à une continuité entre les lignes.

Figure 15 : Groupements interoculaires. Les stimuli en B alternent entre images de droite et gauche tout autant qu'entre les images recombinaées comme en A. Figure issue de Kovacs et al. (1996).

Ces éléments justifient l'existence d'une compétition entre orientations. Ils ont amené à prendre en compte au moins deux niveaux (Figure 16) pour expliquer la rivalité d'orientation, comme par exemple dans le *modèle multi-niveau* de Freeman (2005) ou dans le *modèle hiérarchique* de Wilson (2003). Ces modèles rendent compte de nombreuses propriétés, dont la rivalité permutée et la rivalité monoculaire (Andrews, 2001) mais pas les groupements interoculaires. Pour cela, des modèles potentiellement beaucoup plus complexes sont nécessaires (Grossberg, Yazdanbakhsh, Cao, & Swaminathan, 2008; Tong, Meng, & Blake, 2006). Une étude récente suggère que les groupements interoculaires peuvent très bien correspondre à des groupements entre régions monoculaires plutôt qu'entre percepts binoculaires (Lee & Blake, 2004).

Dans la compétition interoculaire, l'information en compétition est donc l'œil d'origine. Cela signifie qu'en présentant une orientation droite dans l'œil droit et gauche dans l'œil gauche, les percepts possibles sont « orientation droite vue dans l'œil droit » ou l'œil gauche et de même avec l'orientation gauche. Or, il n'y a pas d'accès conscient à l'œil d'origine (impossibilité de la tâche utroculaire: Wolfe & Franzel, 1988), simplifiant les possibilités aux deux percepts correspondant aux orientations. Une suppression interoculaire existe forcément pour au moins trois raisons :

(1) Un modèle qui ne postule qu'une compétition entre orientations à un niveau binoculaire ne pourrait rendre compte de la perception d'un plaid (orientations orthogonales simultanées) en perception normale.

(2) Les expériences de détection de cibles flashées pendant la suppression montrent que tout le champ oculaire occupé par l'orientation en rivalité est supprimée plutôt que l'orientation seulement (cf. II.B pour plus de détails).

(3) Lorsqu'une orientation est complètement dominante et que les images sont inter-changées entre les yeux, un renversement a lieu systématiquement (Blake, Westendorf, & Overton, 1980; Lee & Blake, 2004; voir aussi: Nguyen, Freeman, & Wenderoth, 2001; Walker & Powell, 1979). Ce renversement n'est pas déclenché par les perturbations induites par la modification des images. En effet, lorsque le contraste est diminué jusqu'à zéro, le renversement n'a lieu que si les images sont inter-changées avant que le contraste ne soit augmenté à nouveau à sa valeur initiale.

L'un des problèmes est que les modèles actuels qui expliquent la rivalité entre orientations ne parviennent pas à rendre compte de ces trois phénomènes en même temps. La raison, selon moi, est qu'il faut nécessairement un niveau monoculaire en sortie de la perception des orientations pour créer ces trois derniers phénomènes. Je propose donc que la compétition entre orientations

existe mais se greffe sur le niveau monoculaire. Il faut noter que l'existence d'une compétition ne veut pas forcément dire que les renversements ont lieu au même niveau (il peut s'agir d'une simple suppression interoculaire). Ceux-ci peuvent avoir d'autres causes que l'adaptation dans le réseau de compétition, notamment l'attention ou une adaptation à autre niveau de compétition qui aurait des connexions en retour.

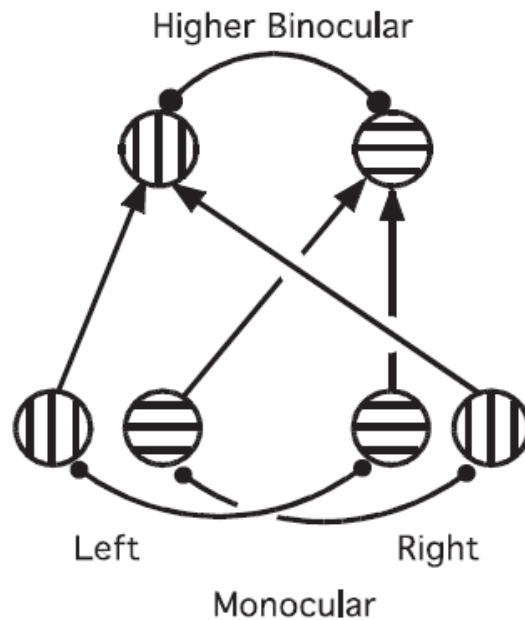


Figure 16 : Modèle hiérarchique de Wilson (2003) avec des compétitions aux niveaux monoculaires orientés et binoculaires orientés.

II.A.2 Rivalité de couleur

La compétition entre différentes couleurs existe aussi, indépendamment des compétitions entre orientations et interoculaire.

La couleur constitue-t-elle vraiment un niveau de compétition indépendant ? Pour répondre à cette question, une expérience a mesuré le taux de bistabilité en fonction de la différence de couleur dans de nombreuses conditions (Knapen, Kanai, Brascamp, van Boxtel, & van Ee, 2007). Le résultat est que la quantité de bistabilité due à la compétition entre couleurs s'ajoute linéairement (Figure 17) avec celle due à la compétition interoculaire (conditions présentation continue et clignotement) et celle due à la compétition entre orientations (conditions rivalité monoculaire et permutée). La couleur a donc son propre niveau de compétition.

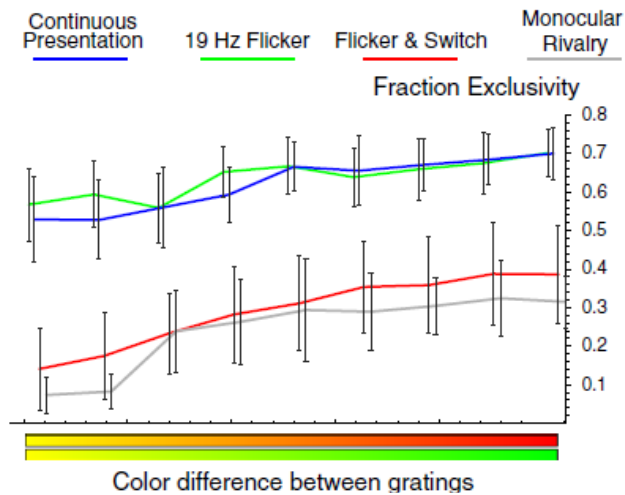


Figure 17 : Taux de bistabilité (exclusivité) en fonction de la différence de couleur (abscisse), de la compétition interoculaire (courbes bleue et verte) et de la compétition entre orientations (courbes rouge et grise). Figure issue de Knapen et al. (2007).

II.A.3 Rivalité de mouvement

La compétition entre directions de mouvement existe aussi.

Selon la version de la *théorie des deux voies* de Carslon and He (2000), le canal chromatique parvo-cellulaire peut induire de la rivalité tandis que le système magno-cellulaire constitue un système achromatique par lequel ont lieu la fusion et l'extraction de la disparité. Le système magno-cellulaire étant responsable de l'extraction du signal de mouvement, cette théorie implique qu'il n'y a pas de rivalité de mouvement. Selon certaines études, le mouvement semblait effectivement immunisé contre la rivalité binoculaire (e.g. Ramachandran (1991) et les preuves contre, que je développe en section II.A.4). On trouve ainsi que des images de points en mouvement dans des directions différentes fusionnent (Marshak & Sekuler, 1979). Il fut démontré plus tard que la fusion était probablement due à la trop grande taille du stimulus et que les points sont bien en rivalité pour des disparités de direction de plus de 30° (Blake et al., 1985)²². D'autres travaux ont confirmé cette donnée pour des réseaux en mouvement (Fox, Todd, & Bettinger, 1975; Logothetis & Schall, 1990) mais les réseaux peuvent aussi induire un mouvement de vergence et la différence de phase être interprétée comme un signal de profondeur stéréoscopique. Une solution consiste à utiliser du mouvement radial. Une expérience existe en mouvement radial (Wade, de Weert, &

²² Un autre problème de l'étude de Marshak et Sekuler est que les points n'étant présentés qu'une seconde, la rivalité n'est pas forcément remarquée, d'autant plus qu'il s'agit d'une simple réponse subjective ici.

Swanston, 1984) mais elle utilise des fréquences spatiales différentes ou des orientations perpendiculaires (contractions), créant du même coup une rivalité d'orientation.

Existe-t-il d'autres compétitions en rivalité? Il a été rapporté une compétition entre des images très différentes comme un visage et une maison et il est tentant de penser qu'une compétition inter-objets existe. Avec ce stimulus, une étude IRMf montre que l'activité des zones corticales associées avec le traitement des visages et des lieux corrèle avec la perception consciente (Tong, Nakayama, Vaughan, & Kanwisher, 1998). Avant de conclure, il est nécessaire d'entreprendre des expériences plus rigoureuses établissant si cette rivalité ne résulterait pas simplement d'une compétition locale entre couleurs ou orientations.

II.A.4 Interactions entre compétitions

Les niveaux de compétition sont très indépendants mais le niveau interoculaire apparaît comme primordial : j'avance qu'un retour systématique vers les zones monoculaires est opéré à la sortie des autres compétitions.

Nous avons admis que les compétitions entre orientations et entre couleurs sont indépendantes. Certaines données physiologiques ne suggèrent pas ceci. Ainsi, des neurones du singe en V1 ont des préférences à la fois pour une orientation et une couleur, suggérant que couleur et orientation sont codées au même niveau (Johnson, Hawken, & Shapley, 2001) et que les compétitions sont conjointes. Pourtant, en utilisant le stimulus présenté en Figure 18, Hong et Shevell (2006) montrent qu'un percept composé des couleurs issues de chaque œil et d'une forme monoculaire (réseau vertical) domine dans 20% des cas, lorsque les bandes grises sont de même luminance que la couleur.

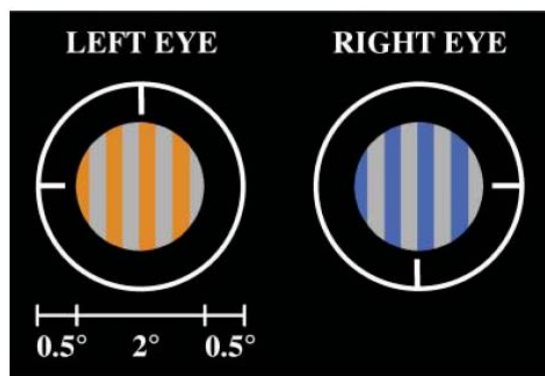


Figure 18 : Liage incorrect. Un percept formé de la couleur orange d'un œil et bleu de l'autre œil, à la place des bandes grises, apparaît dans 20% des cas. Figure issue de Hong et Shevell (2006).

Toutefois, cette dépendance à l'équiluminance et le fait que le liage incorrect n'ait lieu que dans les trente premières secondes suggère qu'une fusion stéréoscopique incorrecte est opérée.

Finalement, une expérience plus contrôlée, utilisant le même stimulus mais avec un réseau vertical dans un œil et horizontal dans l'autre, obtient une rivalité d'orientation avec un percept présentant souvent les deux couleurs (Hong & Shevell, 2009).

Je crois qu'un aspect important est qu'il est possible que la couleur reste en fait liée à une position, même si libre de la forme, et ce, bien que l'étude que nous venons de voir suggère l'inverse puisque des lignes horizontales ou verticales seulement sont perçues (Figure 19, panneau central et de gauche). Ainsi, les régions colorées peuvent fusionner avec les fonds respectifs (Figure 19, panneau de droite, zones rouges et vertes) tandis que seules certaines régions sont en rivalité (même panneau, zones jaunes). Dans ce cas, lorsque les zones en rivalité s'accordent, des lignes orientées de même couleur sont formées, et les régions de l'autre couleur peuvent diffuser le long de ces lignes, formant une grille à deux couleurs²³. D'autre part, dans cette expérience, le phénomène est facilité parce que la forme n'est définie que par la couleur (équiluminance).

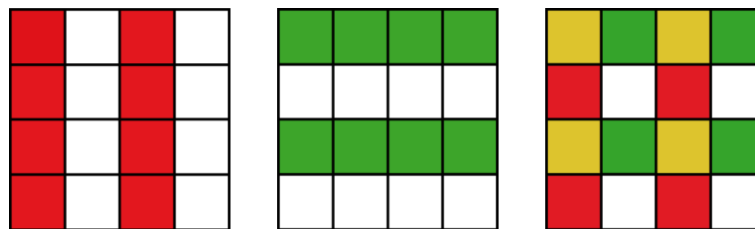


Figure 19 : Stylisation du stimulus utilisé dans Hong et Shevell (2009). A gauche, le stimulus présenté dans l'œil gauche, au centre, celui présenté dans l'œil droit et à droite, la fusion - rivalité des deux (en rouge et vert, les fusions, en jaune, les parties en rivalité).

Une autre étude confirme qu'un liage incorrect entre forme et couleur peut avoir lieu en utilisant un paradigme de suppression flash (cf. IV.A) favorisant l'orientation d'un œil et la couleur de l'autre œil (Holmes, Hancock, & Andrews, 2006). Dans une autre expérience (Hong & Blake, 2009) en suppression flash continue, la couleur apparaît flottante tandis que la forme est complètement supprimée : un Mondrian monochrome est présenté dans un œil et une ligne orientée et colorée dans l'autre œil. Le niveau des orientations peut donc entrer en rivalité tandis que la rivalité de couleur a lieu ou non, de manière indépendante, créant ces liages incorrects.

Finalement, Ramachandran (1991) a rapporté une interaction entre mouvement et orientation. Il commençait par provoquer un effet consécutif de mouvement dans un sens dans un œil et dans l'autre sens dans l'autre œil. Ceux-ci s'annulaient lorsqu'il regardait des configurations

²³ Une puissante diffusion existe avec la couleur (cf. Pinna, Brelstaff, & Spillmann, 2001) ou dans la perception des effets-consécutifs : la couleur peut se propager le long de contours et se mélanger avec d'autres pendant l'opération (van Lier, Vergeer, & Anstis, 2009).

fusionnables mais renaient en rivalité lorsqu'il regardait des configurations en rivalité d'orientation. Pourtant, avec un paradigme similaire, une étude plus récente trouve de la rivalité de mouvement même sans rivalité d'orientation (Blake et al., 1998).

Puisque les compétitions sont indépendantes, comment expliquer qu'invertir les images entre les yeux inverse toujours le percept (cf. II.A.1) ? Je pense que les compétitions ont lieu indépendamment à chaque niveau mais que la sélection revient finalement au niveau monoculaire (Lamme & Roelfsema, 2000 développe une théorie de la conscience basée sur une idée similaire).

II.A.5 Niveau hiérarchique des compétitions

La rivalité de couleur a lieu entre couleurs perçues (après induction chromatique). La rivalité d'orientation a lieu après l'illusion centre-pourtour qui est monoculaire et binoculaire mais les données sont manquantes pour l'illusion d'orientations superposées et de Zöllner.

Nous avons vu que différentes compétitions relativement indépendantes ont lieu dans le système visuel de rivalité binoculaire. Nous nous intéressons maintenant au niveau relatif de ces compétitions par rapport à d'autres étapes du traitement cognitif.

Lorsqu'un stimulus est présenté, ses attributs (comme l'orientation ou la couleur) sont traités en plusieurs étapes avant de devenir conscients. Les étapes impliquent la transduction et des systèmes créant des contrastes de sorte que l'attribut perçu diverge du stimulus présenté. Une importante question à propos de la rivalité est de savoir si les compétitions ont lieu entre les attributs tels qu'ils sont juste après la transduction ou entre attributs perçus.

Pour la couleur, le système de contraste (entre couleurs adjacentes) est appelé *induction chromatique*. Une rivalité peut avoir lieu entre deux couleurs physiquement identiques (donc identiques après transduction) mais différentes après induction chromatique (Andrews & Lotto, 2004; Hong & Shevell, 2008). Cela indique que la rivalité a lieu après l'induction chromatique.

L'illusion d'orientation centre-pourtour (répulsion entre orientations d'une zone et de son pourtour) n'est pas influencée par la rivalité (Rao, 1977; Wade, 1980) : lorsque le centre et le pourtour sont dans le même œil, la suppression du pourtour n'a pas d'effet. Cela implique que ce contraste d'orientation a lieu avant le site de suppression de la compétition entre orientations. L'illusion se transfère à 50% entre les yeux lorsque centre et pourtour sont dans des yeux différents

(Wade, 1980)²⁴ : l'illusion est donc la somme d'un contraste à un niveau monoculaire et d'un contraste à un niveau binoculaire.

L'illusion d'orientations superposées est une répulsion entre des orientations superposées (Gibson & Radner, 1937a; O'Toole & Wenderoth, 1977; Over, Broerse, & Crassini, 1972). L'illusion est en rapport avec l'illusion de Zöllner (Kitaoka & Ishihara, 2000; Oyama, 1975; Wallace & Crampin, 1969; Zöllner, 1860) : des lignes droites apparaissent plus inclinées lorsqu'elles sont coupées par une autre plus courte. Il a d'abord été rapporté que ces illusions peuvent dans certains cas influencer les calculs stéréoscopiques (Squires, 1956). La déviation illusoire est monoculairement interprétée comme une disparité entre les yeux et est convertie en profondeur. Pourtant, la plupart des études suivantes ne confirment pas cela (Julesz, 1971; Ogle, 1962). Aucune donnée n'existe sur la rivalité binoculaire.

Les contours illusoire peuvent aussi fusionner en stéréoscopie et générer de la rivalité (Fahle & Palm, 1991; Harris & Gregory, 1973) mais un contexte défini par des contours illusoire n'influence pas la rivalité (Blake, 1981; Sobel & Blake, 2002a).

II.B La vision normale est-elle cyclopéenne ?

Les expériences sont favorables à une vision cyclopéenne normale mais le débat sur cette question reste ouvert.

Il est traditionnellement admis que la perception visuelle est cyclopéenne. Les deux images monoculaires seraient fusionnées de telle manière que la perception dans des conditions normales n'est pas équivalente une vision issue du point de vue de l'un des yeux, mais plutôt d'un point de vue situé à égale distance des deux yeux (comme l'œil frontal d'un cyclope).

Certains chercheurs ont avancé que la vision normale était systématiquement en rivalité, c'est-à-dire en suppression complète de l'une des images monoculaires. De nombreux travaux mesurent alors la détectabilité de cibles flashées soit dans l'œil dominant, supprimé ou en vision normale (binoculaire ou monoculaire). La plupart des travaux trouvent une détectabilité meilleure dans l'œil dominant comparé à l'œil supprimé (Blake & Camisa, 1979; Fox & Check, 1972; Fukuda, 1981; Nguyen et al., 2001; Norman, Norman, & Bilotta, 2000; Smith, Levi, Harwerth, & White, 1982; Wales & Fox, 1970)²⁵. D'autres travaux ne rapportent pas ces différences. Dans l'expérience de Fox

²⁴ Mais une autre étude ne trouve que très peu de transfert (Walker, 1978b).

²⁵ Etrangement, Blake et Camisa (1979) rapportent une différence de détectabilité entre œil dominant et supprimé mais qui ne varie pas du tout avec la différence de contraste entre les yeux (et donc avec la force de

& Check (1966b), 3 sujets sur 4 n'ont aucune différence entre les conditions « rivalité binoculaire », « suppression » ou « fusion ». Certaines expériences ne trouvent aucune différence entre vision normale et vision dans l'œil dominant (Blake & Camisa, 1978; Fox & Check, 1968). Finalement, des cibles flashées monoculairement sont plus longues à détecter dans l'œil supprimé en rivalité que dans l'œil dominant en rivalité tandis qu'on n'observe pas de différence entre un stimulus monoculaire et un binoculaire en fusion (Blake & Boothroyd, 1985; Fox & Check, 1966, 1968; O'Shea, 1987).

Néanmoins, les différences des seuils de détection de cibles entre œil dominant et supprimé (0.3 à 0.5 unité log) sont comparables à la différence entre une cible présentée sur un fond plutôt que sur une figure (Weitzman, 1963), ce qui fut aussi confirmé avec le vase de Rubin, dans lequel la figure et le fond s'inversent (Wong & Weisstein, 1982). Ces éléments indiquent que la suppression mesurée n'est probablement que la partie attentionnelle (endogène) qui ne peut être portée sur le stimulus et n'est pas comparable avec une disparition physique du stimulus (Walker, 1978a). Toutefois, si l'on tient compte des conclusions exposées en section III.E.2 (sur la cécité au changement et inattentionnelle) qui établissent la pauvreté de la vision en dehors du focus attentionnel (endogène), alors ce qui est supprimé en rivalité est bien équivalent à une disparition physique. La vision normale serait donc binoculaire.

Pourtant, d'autres données contre l'idée d'une vision binoculaire existent comme celles sur la *fusion anormale* (Wolfe, 1986) : lorsque des stimuli sont présentés en rivalité, ils commencent par fusionner, ce qui peut être expliqué par un délai dans le mécanisme de suppression. Lorsque ces mêmes stimuli sont flashés moins de 150 ms après un épisode bistable, il n'y a pas de fusion anormale (la suppression est déjà active). Lorsque ces mêmes stimuli sont flashés après un épisode non-bistable (présentation binoculaire), aucune fusion anormale n'est observée : pourtant, la suppression ne devrait pas être en action pendant la vision normale. Wolfe conclut que la vision normale implique la suppression constante d'un œil.

suppression). De même, Fox et Check (1972) trouvent une indépendance entre détectabilité dans l'œil supprimé et durée depuis le dernier renversement. Le mécanisme provoquant la diminution de détectabilité semble être complètement différent de celui provoquant les renversements, ce qui soutient l'indépendance entre suppression et renversement développée en I.B.9.

II.C Qu'est-ce qui est supprimé en rivalité?

Les données sont souvent contradictoires sur cette question.

D'après le second principe de Levelt amélioré (Brascamp et al., 2006), la durée de phase d'un percept dépend du stimulus le plus fort, même lorsque celui-ci est supprimé. Cela n'implique pas que ce stimulus est analysé même lorsqu'il est supprimé puisqu'il est possible qu'il soit analysé une fois pendant une phase de dominance et que cette analyse reste stockée pendant la phase de suppression (Walker, 1978a)²⁶.

La suppression en rivalité est non-spécifique : les déficits de détection de cible montrent que tous les aspects de la zone monoculaire sont supprimés (cf. section II.B). Nous avons aussi développé les éléments qui montrent que ces déficits de détection sont de faible amplitude : basé sur cet élément, une équipe propose que la suppression est en fait illusoire (Leopold, Maier, Wilke, & Logothetis, 2005).

Les études²⁷ divergent sur l'analyse du contenu sémantique des images supprimées. Ainsi, des images de violence sont perçues plus fréquemment par les hommes que par les femmes (Moore, 1966) et les images de comportements interdits sont perçues plus fréquemment par les policiers et auteurs desdits comportements que par une population contrôle (Berg & Toch, 1964). D'autres études ne trouvent pas cela (Zimba & Blake, 1983). Les études divergent aussi sur l'analyse des mots : par exemple, les mots plus fréquents ainsi que les mots plus neutres dominant (Davis, 1959, d'après Walker, 1978a) indiquant que la structure des mots est analysée, mais d'autres études trouvent l'inverse (Cave, Blake, & McNamara, 1998). La lecture dichoptique est par ailleurs impossible (Blake, 1988).

Une expérience montre que des cibles de différentes longueurs d'onde sont détectées et donc supprimées différemment (Smith et al., 1982) mais ces résultats peuvent être mis en doute pour des raisons méthodologiques car l'expérience a utilisé une méthode des limites ascendante, biaisée, et sur un unique observateur, l'auteur.

²⁶ Pour confirmer l'hypothèse d'analyse du stimulus pendant sa suppression, il faudrait travailler uniquement sur le premier percept, avant toute phase de dominance du stimulus.

²⁷ Pour la suite, je ne prends en considération que les expériences qui montrent un effet sur le premier percept afin d'éviter de mélanger la nature des suppressions (e.g. attentionnelle, après une première analyse du stimulus finalement supprimé) et j'exclue aussi les études en suppression flash continue car elles incluent des perturbations qui impliquent très certainement une modulation attentionnelle exogène (contenu sémantique des images: Jiang, Costello, & He, 2007; émotions: Yang, Zald, & Blake, 2007).

Le contrôle de la pupille et des micro-saccades est par contre supprimé pendant la rivalité. Ainsi, rendre floue une image supprimée ne déclenche pas le réflexe oculomoteur d'accommodation (Flitcroft & Morley, 1997). Le réflexe de rétractation des pupilles (à un flash) est diminué quand le flash a lieu pendant la suppression (Brenner, Charles, & Flynn, 1969; Lorber, Zuber, & Stark, 1965). Le nystagmus optokinétique est également réduit (Logothetis & Schall, 1990).

II.D Relations entre rivalité binoculaire et vision stéréoscopique

La vision stéréoscopique a lieu uniquement si la rivalité n'a pas lieu au même niveau de compétition (entre orientations, mouvements ou couleurs).

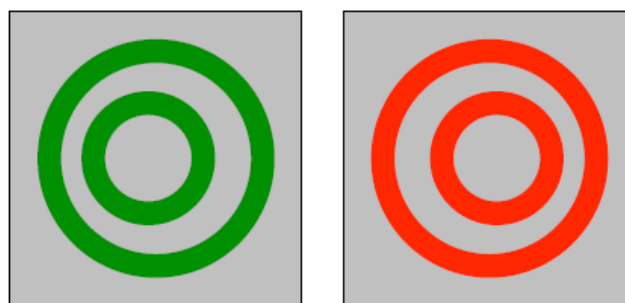
Quatre théories s'opposent sur le lien entre vision stéréoscopique et rivalité. La plus ancienne fait l'hypothèse que la disparité est extraite des deux images mais que celles-ci ne fusionnent pas à un bas niveau de traitement (von Helmholtz, 1911). La fusion serait un procédé mental de haut-niveau qui pourrait avoir lieu ou non mais de manière contrôlée. Les trois autres théories sont la vision monoculaire, les deux voies et la réponse duelle.

La *théorie de la vision monoculaire* affirme que la fusion n'a jamais lieu mais que les images sont alternativement supprimées de la conscience, de manière analogue à la rivalité binoculaire. La vision stéréoscopique serait un processus qui opère par la suite, par comparaison entre l'image perçue et celle supprimée de la conscience mais tout de même stockée. Nous avons vu les éléments contre cette théorie en section II.B.

D'après la *théorie des deux voies*, la deuxième image, au lieu d'être supprimée, est traitée dans le but d'extraire la disparité dans un canal parallèle (Kaufman, 1964). Cette théorie est très proche de celle de Wolfe (1986, cf. II.G). Kaufman appuie cette idée en utilisant un stéréogramme de points créant de la profondeur tandis que le fond est en rivalité sur la couleur. Une version faible est que la rivalité a lieu sur le canal chromatique tandis que la fusion / vision stéréoscopique sur la même zone spatiale se produit sur un canal achromatique. Treisman (1962) avançait la même hypothèse en montrant que la rivalité de couleur pouvait avoir lieu tandis que la disparité était extraite par la forme (Figure 20)²⁸. Des variantes de cette expérience fonctionnent avec des points aléatoires (Ramachandran & Sriram, 1972) et avec une rivalité entre couleurs illusoires (Hong & Shevell, 2008). Carlson et He (2000) font l'hypothèse que le canal chromatique portant la rivalité est le

²⁸ Néanmoins, le premier à reporter ce phénomène est Bourdon (1902) – Chapitre IX – La perception binoculaire de la profondeur – pp.255.

système parvo-cellulaire tandis que le système de fusion et d'extraction de la disparité constitue le système magno-cellulaire. Le fait que la rivalité et la vision stéréoscopique peuvent avoir lieu sur des fréquences spatiales différentes suggère cette dichotomie (les systèmes parvo et magno différant dans la taille de leurs champs récepteurs). Un autre indice est que le système magno est très sensible aux disparités contrairement au système parvo²⁹. Enfin, il est possible d'obtenir une rivalité de couleur et de forme tandis qu'une information de mouvement est localement fusionnée pour créer une sensation de battement (Carlson & He, 2000). Un problème commun aux expériences évoquées tient dans l'existence d'une hiérarchie de rivalités : il reste donc encore à démontrer que la vision stéréoscopique et la rivalité peuvent avoir le même substrat. Si la vision stéréoscopique utilisait la forme par exemple, et que cette même forme ne pouvait être en rivalité au même endroit, il s'agirait là d'une preuve correcte. Ce type de preuve est censé exister (Kaufman, 1964; Ogle & Wakefield, 1967; Ramachandran, Rao, & Vidyasagar, 1973). Je pense néanmoins que ces preuves ne sont pas valides car dans les stimuli utilisés, des contours illusoires (de bordure) peuvent être utilisés pour la vision stéréoscopique, et ces contours n'ont pas le même statut que les contours réels en rivalité (comme dans Su, He, & Ooi, 2009). D'autres encore utilisent la vision stéréoscopique à partir des différences de fréquence spatiale (Blakemore, 1970; Tyler & Sutter, 1979) mais montrent que rivalité et vision stéréoscopique ne peuvent coexister que sur des canaux de fréquence spatiale différents (Buckthrought, Kim, & Wilson, 2008; Julesz & Miller, 1975). Finalement, Wolfe (1986) rapporte qu'un stéréogramme de points peut provoquer de la vision stéréoscopique alors que le fond est en rivalité d'orientation. Cette donnée est intéressante mais peu étayée (pas de mesure) et il reste la possibilité que la rivalité d'orientation soit traitée séparément de la vision stéréoscopique de points mais pas de la vision stéréoscopique d'orientation. Un autre élément intéressant est que la vision stéréoscopique n'a pas lieu quand la polarité du contraste est inversée entre les yeux (e.g. un objet plus clair que le fond dans un œil et plus sombre dans l'autre), une situation qui résulte en rivalité (Treisman, 1962).



²⁹ Pourtant, l'acuité stéréoscopique est la même avec des contrastes lumineux ou des contrastes colorés (Li & Guo, 1995).

Figure 20 : Rivalité de couleur en vision stéréoscopique. Stimulus utilisé par Treisman (1962). La fusion croisée place un cercle en avant de l'autre, tout en étant en rivalité. Figure fournie par Randolph Blake.

Finalement, la théorie actuelle la plus admise (Blake, 1989; Julesz & Tyler, 1976), dite *théorie de la réponse duelle*, avance que la fusion est la première étape (ou le premier mode de fonctionnement du réseau) et que l'extraction de la disparité a lieu uniquement quand la fusion réussit. Lorsque celle-ci échoue, les images sont localement engagées dans la deuxième étape, celle de la rivalité (ou alors le réseau passe dans un mode de fonctionnement provoquant de la rivalité). J'ai développé en section II.B les éléments en faveur de l'existence d'une fusion.

Il est également intéressant de remarquer que des régions monoculaires peuvent échapper à la rivalité binoculaire sans fusionner pour autant, lorsque leur géométrie est compatible avec des occlusions (Nakayama & Shimojo, 1990; Shimojo & Nakayama, 1990, 1994).

II.E Relation entre rivalité et figures ambigües

Au moins quatre hypothèses peuvent être avancées à propos de la relation entre rivalité et figures ambigües : (1) elles peuvent impliquer des étapes de traitement fonctionnellement complètement différentes, (2) ou les mêmes étapes, (3) ou des étapes similaires mais indépendantes, (4) ou encore partager certains traitements et pas d'autres. L'hypothèse 4 est valide pour les phénomènes bistables au sein de la modalité visuelle et l'hypothèse 3 est valide entre modalités auditive et visuelle.

II.E.1 Propriétés similaires

Si rivalité et figures ambigües partageaient des propriétés, les étapes de traitement ne pourraient être fonctionnellement complètement différentes (hypothèse 1). Beaucoup d'études ont trouvé des propriétés dynamiques similaires. Par exemple, le rythme des renversements en rivalité monoculaire et binoculaire est modulé par les mêmes facteurs, comme la différence de teinte et de fréquence spatiale des stimuli (Andrews & Purves, 1997) ou la taille et la couleur des images (O'Shea et al., 2009). La distribution gamma des phases de la rivalité binoculaire est retrouvée pour le cube de Necker (Brascamp et al., 2005), la rivalité d'inclinaison (van Ee, 2005), l'audition bistable (Pressnitzer & Hupé, 2005, 2006), la rivalité monoculaire (O'Shea et al., 2009), la cécité induite par le mouvement (Carter & Pettigrew, 2003) ou la rivalité de plaids en mouvement (Rubin & Hupé, 2005). L'indépendance des durées de phases successives de la rivalité (Blake et al., 1971) est retrouvée avec les plaids (Rubin & Hupé, 2005) ou l'audition bistable (Pressnitzer & Hupé, 2006).

La seconde proposition de Levelt améliorée (Brascamp et al., 2006) est aussi valide pour la sphère en rotation (Klink, van Ee, & van Wezel, 2008).

II.E.2 Différences rivalité / figures ambiguës

Si rivalité et figures ambiguës n'impliquaient que les mêmes étapes, elles n'auraient que des propriétés similaires. Au lieu de se focaliser sur les similarités, il est possible de se concentrer sur les différences. Par exemple, la rivalité monoculaire, d'inclinaison ou de plaids en mouvement ont des phases beaucoup plus longues que la rivalité binoculaire (Andrews & Purves, 1997; van Ee et al., 2005; Sheppard & Pettigrew, 2006). Le contrôle volontaire est beaucoup plus efficace sur la rivalité d'inclinaison ou le cube de Necker que sur la rivalité (van Ee et al., 2005; Meng & Tong, 2004). En plus de différences quantitatives, il existe une différence qualitative : nous avons vu que l'exclusivité des percepts est une propriété des figures ambiguës³⁰ mais pas de la rivalité binoculaire (section I.B.2). Finalement, la stimulation par TMS³¹ au niveau des aires visuelles perturbe les renversements de la rivalité binoculaire mais pas des figures ambiguës (Pearson, Tadin, & Blake, 2007). L'hypothèse 2 semble donc invalide.

II.E.3 Corrélations et synchronisations

Pour donner raison à l'une des hypothèses 3 ou 4, il faut déterminer si les étapes de traitement partagées sont simplement fonctionnellement similaires ou sont les mêmes, comme par exemple en cas d'existence d'un oscillateur central ou périphérique à l'origine des renversements (Carter & Pettigrew, 2003). Une corrélation forte existe entre les taux de renversement en rivalité et en cécité induite par le mouvement (Carter & Pettigrew, 2003), en rivalité d'orientation et en rivalité de plaids (Sheppard & Pettigrew, 2006), ainsi qu'entre distribution de durées de phase (Carter & Pettigrew, 2003; Sheppard & Pettigrew, 2006). Ceci est un élément en faveur de l'hypothèse d'une étape de traitement partagée. Andrews et Purves (1997) ont rapporté que les renversements entre rivalité monoculaire et binoculaire se synchronisent, contrairement à ceux entre audition bistable et rivalité de plaids (Hupé, Joffo, & Pressnitzer, 2008). De plus, l'ampleur avec laquelle le contrôle volontaire est possible ne corrèle pas entre rivalité de plaids en mouvement et audition bistable (Pressnitzer & Hupé, 2006). Il est probable que l'hypothèse 4 (du

³⁰ [à l'exception de la rivalité monoculaire (Wade, 1975)]

³¹ Trans-cranial Magnetic Stimulation ; Stimulation magnétique à travers le crâne.

traitement partagé) soit valide pour la modalité visuelle et l'hypothèse 3 (de traitements similaires mais indépendants) soit valide entre modalités (visuelle et auditive).

II.F Bases biologiques

Des preuves existent pour localiser les compétitions en V1, V2, MT, V4, IT et le cortex frontopariétal : la question reste donc ouverte³².

A quel niveau du système nerveux peut-on trouver un corrélât neuronal de la rivalité ? Des corrélats sont trouvés dès le corps genouillé latéral chez le chat anesthésié (Varela & Singer, 1987) mais pas chez le singe alerte (Lehky & Maunsell, 1996; Leopold & Logothetis, 1996). Les enregistrements unitaires chez le singe alerte montrent que seuls 20% des neurones en V1 et V2 (Leopold & Logothetis, 1996; Logothetis & Schall, 1989; Sheinberg & Logothetis, 1997) répondent de manière corrélée avec la perception en rivalité, au contraire de MT et V4 (40%) et du cortex inféro-temporal (90%). La même configuration est retrouvée en suppression flash (Leopold et al., 2005). Une équipe a trouvé une corrélation de l'activité hémodynamique avec la rivalité dans la région de la tâche aveugle en V1, qui est donc monoculaire, ce qui suggère une compétition interoculaire (Tong & Engel, 2001). Cependant, Andrews (2001) explique que ce résultat est aussi compatible avec une compétition entre neurones orientés. Pettigrew (2001) isole onze raisons d'aller chercher la cause de la bistabilité ailleurs qu'en V1 : en plus de celles que j'ai déjà développées ailleurs, j'évoquerai rapidement l'influence des désordres mentaux et la grande variabilité interindividuelle. Une étude EEG trouve que les renversements des figures ambiguës corrélaient avec une variation transitoire du cortex frontopariétal droit (Struber, Basar-Eroglu, Hoff, & Stadler, 2000), ce qui est confirmé par des études d'imagerie (Kleinschmidt, Büchel, Zeki, & Frackowiak, 1998; Sterzer, Russ, Preibisch, & Kleinschmidt, 2002), de même qu'en rivalité binoculaire (Lumer, Friston, & Rees, 1998; Lumer & Rees, 1999). Des modulations d'activité en IRMf liées à la perception de la rivalité binoculaire sont finalement observées récemment en V1 avec les ondes de transition (Lee, Blake, & Heeger, 2005, 2007). D'autres travaux mettent en valeur la synchronisation des neurones pendant la perception consciente (Block, 2005; Christopher deCharms & Merzenich, 1996; Fries, Roelfsema, Engel, König, & Singer, 1997; Fries, Schroder, Roelfsema, Singer, & Engel, 2002; Lumer, 1998; Srinivasan, Russell, Edelman, & Tononi, 1999).

³² L'approche principale de cette thèse étant largement psychophysique, cette partie n'est pas du tout exhaustive : il existe une littérature foisonnante sur le sujet, que je n'évoquerai pas.

II.G Modèles de la rivalité binoculaire

Aucun modèle ne parvient à rendre compte de plus de la moitié des propriétés les plus connues de la rivalité binoculaire.

De nombreuses propriétés de la rivalité binoculaire sont donc maintenant suffisamment bien établies pour espérer être modélisées (cf. Tableau 2). Presque tous les modèles neuronaux rendent compte du caractère irrépessible. La plupart des modèles implémentent le caractère stochastique des durées de phase à partir du bruit injecté dans le système. D'autres modèles sont centrés sur cette propriété en proposant une chaîne de Markov avec états cachés (Merk & Schnakenberg, 2002; Otterpohl, Haynes, Emmert-Streib, Vetter, & Pawelzik, 2000). Le second principe de Levelt est apparemment facilement modélisable à l'aide d'une simple suppression réciproque entre deux neurones et d'adaptation (Kalarickal & Marshall, 2000). Néanmoins, la plupart des modèles n'ont pas tenté de reproduire la nouvelle version du second principe (Brascamp et al., 2006). Une variation du modèle de Kalarickal et Marshall (2000) permet de rendre compte des ondes de rivalité (Stollenwerk & Bode, 2003). Le modèle oppose les valeurs des attributs (orientation droite, gauche, couleur verte, rouge) plutôt que leur origine oculaire : il s'agit donc d'un modèle de compétition entre orientations. Une autre variation permet d'expliquer certaines données de la rivalité de mouvement (Lankheet, 2006).

L'un des premiers modèles de rivalité est celui de Wolfe (1986; Blake & O'Shea, 1988; Wolfe, 1988). Il propose que la rivalité est le résultat normal de la vision et que la vision stéréoscopique a lieu indépendamment dans une voie parallèle. La perception cyclopéenne n'existe pas. Le modèle explique principalement les données sur l'adaptation (transfert interoculaire et adaptation sous suppression). Il est constitué d'entrées monoculaires, d'une porte OU, de deux portes ET et d'un système de renversement.

La théorie interoculaire propose l'inverse (Blake, 1989) : la fusion binoculaire existe, au service de la vision stéréoscopique et lorsque cette vision est impossible, la fusion n'a pas lieu et est remplacée par de la rivalité binoculaire. Celle-ci est une compétition interoculaire (entre neurones orientés) avec suppression complète de l'une des images monoculaires. Le modèle est intéressant par sa simplicité (Figure 21). Il explique principalement les données sur la détectabilité de cibles monoculaires. La première couche de neurones orientés monoculaires nourrit une seconde binoculaire (fusion). La première couche nourrit aussi une seconde couche monoculaire en parallèle. Une couche intermédiaire d'inter-neurones inhibiteurs transforme cette seconde couche en XOR (ou exclusif) : elle n'est active que lorsque des orientations différentes sont présentées entre les yeux (un réseau monoculaire déclenche aussi le XOR). Cette seconde couche, lorsqu'elle est active, implémente une suppression de l'autre œil au niveau de la première couche.

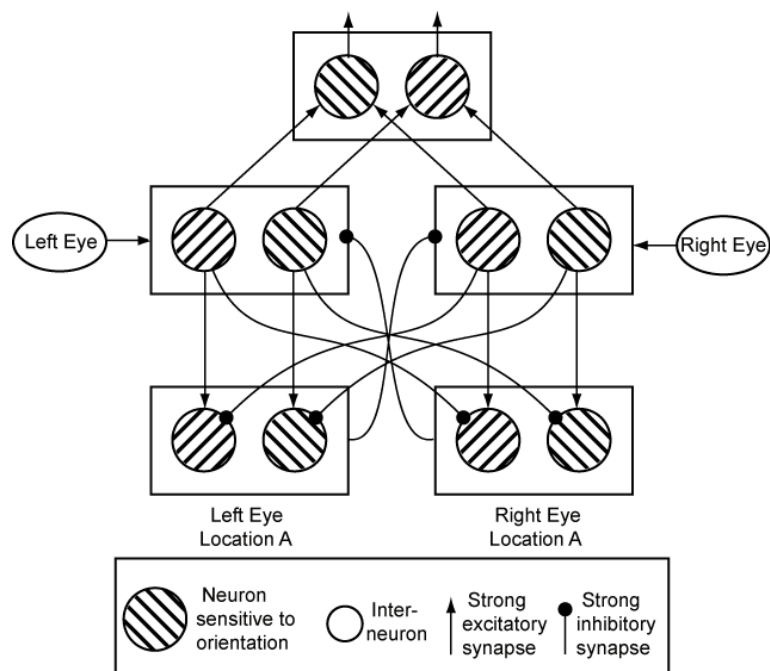


Figure 21 : Implémentation de la théorie interoculaire de Blake (1989). Représentation adaptée du même article, simplifiée pour ne présenter que deux ensembles de neurones orientés et rendre apparent le niveau de sortie. Lorsqu'une boîte est connectée à une autre, cela signifie que toutes les unités représentées dans la boîte sont connectées à toutes les unités représentées dans l'autre boîte.

Le modèle de Lumer (1998), basé sur des données anatomiques, comprend une couche de neurones monoculaires orientés, une couche de neurones binoculaires orientés et une seconde couche binoculaire en compétition entre orientations qui est la sortie du réseau. Le modèle prévoit aussi des neurones répondant uniquement lorsque plusieurs orientations sont présentes, couvrant la perception de plaids. Il n'inclut pas de mécanisme de renversement.

Le modèle hiérarchique de Wilson (2003) explique principalement la rivalité permutée. Il implique une compétition entre neurones orientés monoculaires et binoculaires. Néanmoins, la suppression au niveau monoculaire est sélective (un neurone orienté dans l'œil droit ne supprimera pas un neurone codant pour la même orientation dans l'autre œil) : il s'agit donc de deux niveaux de compétitions entre orientations (Figure 16). Nous discutons certains avantages et défauts de ce modèle en section II.A.1.

Le modèle multi-niveaux (Freeman, 2005; Nguyen et al., 2001) explique principalement la profondeur de suppression à différents niveaux corticaux. Il implique une série de niveaux identiques. Pour la rivalité d'orientation verticale/horizontale, chaque niveau est composé de deux canaux répondant à l'orientation verticale et deux à l'orientation horizontale. Le premier niveau est

monoculaire et les suivants binoculaires. Chaque canal inhibe tous les canaux de même niveau et nourrit le canal du niveau suivant.

Sundareswara et Schrater (2008) proposent un modèle Bayésien de la bistabilité qui pourrait être appliqué à la rivalité. Ce modèle rend compte principalement de l'effet du contexte et des biais initiaux. Après avoir généré une distribution *a posteriori* des interprétations, quelques valeurs sont régulièrement échantillonnées à partir de cette distribution (leur probabilité reste associée). Leur probabilité est pondérée exponentiellement et la plus probable est perçue.

Un modèle anatomique complexe (Grossberg et al., 2008) permet de rendre compte de nombreuses propriétés, principalement des groupements oculaires et des ondes de rivalité, grâce à plusieurs niveaux de compétition. Il est basé sur un circuit appelé dipôle: des connexions excitatrices longue-distance sont envoyées entre neurones binoculaires codant pour des orientations colinéaires. Grâce à un jeu d'inter-neurones inhibiteurs, ces connexions ne sont efficaces que lorsque plusieurs orientations sont alignées. Elles génèrent notamment de la rivalité. Des inhibitions courtes distances non-spécifiques existent ainsi que des connexions retour.

Nous abordons le modèle de codage prédictif (Hohwy et al., 2008) à différents endroits dans cette thèse (cf. **Error! Reference source not found.**) : il s'agit d'un modèle Bayésien à plusieurs niveaux. Chaque niveau prend une décision perceptive puis supprime de l'entrée venant du niveau inférieur, la partie du stimulus expliquée par cette décision.

De nombreux autres modèles de la rivalité existent (Dayan, 1998; Hayashi, Maeda, Shimojo, & Tachi, 2004; Laing & Chow, 2002; Lehky, 1988; Matsuoka, 1984; Mueller, 1990; Tong et al., 2006). Certains se focalisent sur les ondes de rivalité (Bressloff & Webber, 2011; Wilson et al., 2001), la stabilisation en présentation intermittente (Gigante, Mattia, Braun, & Del Giudice, 2009; Klink, van Ee, Nijs, et al., 2008; Wilson, 2007), une figure ambiguë spécifique (Hock, Schöner, & Giese, 2003; Koene, 2006; Otterpohl et al., 2000) et d'autres s'étendent à toute la perception bistable (Braun & Mattia, 2010; Kawamoto & Anderson, 1985, 1985; Lankheet, 2006; Noest, Van Ee, Nijs, & Van Wezel, 2007).

Tableau 2 : Résumé des phénomènes expliqués par différents modèles.

	Wolfe (1986)	Blake (1989)	Lumer (1998)	Kalarickal (2000)	Wilson (2003)	Stollenwerk & Bode (2003)	Freeman (2005)	Sundaeswara & Schrater (2008)	Grossberg et al. (2008)	Hohwy et al. (2008)
Déteçtabilité de cibles	X	√	X	X	X	X	?	X	X	X
Transferts interoculaire d'adaptation	√	?	X	X	?	√	?	X	X	X
Adaptation sous suppression	√	X	X	X	?	X	X	X	X	X
Fusion anormale	√	X	?	?	√	√	X	X	?	X
Ondes de renversement	X	?	X	X	?	√	X	X	√	√/?
Distribution gamma ou log normale des phases	?	?	X	√	√	√	√	√	√	?
Régimes initial et stationnaire	?	?	X	X	?	?	?	√	?	X
Principe II de Levelt amélioré	?	?	X	?	?	?	?	?	?	√/?
Rivalité monoculaire	X	X	?	X	√	√	√	X	√	√/?
Rivalité permutée	?	X	√	X	√	√	?	?	√	√/?
Groupements interoculaires	X	X	X	X	?	√	X	?	√	√
Renversement lors d'un échange interoculaire	√	√	X	√	X	X	X	X	X	X
Plaid en perception normale	√	√	√	?	X	X	X	?	√	√
Rivalité de mouvement	?	?	X	?	?	√	?	?	X	√
Rivalité de couleur	?	?	X	?	?	√	?	?	X	√
Vision stéréoscopique	√	√	?	X	X	X	X	X	√	X

	Wolfe (1986)	Blake (1989)	Lumer (1998)	Kalarickal (2000)	Wilson (2003)	Stollenwerk & Bode (2003)	Freeman (2005)	Sundaeswara & Schrater (2008)	Grossberg et al. (2008)	Hohwy et al. (2008)
Effet du contexte	X	X	X	X	X	?	X	√	?	√
Mécanisme de renversement (A : Adaptation, B : Bayésien)	?	A	X	A	A	A	A	B	A	?
Stabilisation	?	?	?	?	?	?	?	?	?	√/?
Principe II invalide pour petits stimuli										

III. Rôle de l'attention dans la perception bistable

III.A Les différentes formes d'attention

Il existe deux formes d'attention : la ressource attentionnelle (contrôle volontaire d'un processus) et la sélection attentionnelle. La sélection attentionnelle peut elle-même se présenter sous trois formes : spatiale, portée sur un attribut ou sur un objet. Chacune de ces trois formes peut de plus être endogène (contrôlée) ou exogène (automatique).

L'attention est décrite comme une ressource (Kahneman, 1973) et comme un mécanisme de sélection (Broadbent, 1958). Je vais maintenant décrire ces deux formes³³.

³³ La manière de séparer les différentes formes d'attention est ici proche de celle de Posner et Pattersen (Fan, McCandliss, Sommer, Raz, & Posner, 2002; Posner & Pattersen, 1990; Seitz & Watanabe, 2005). Le *système orientant* (*orienting*) correspond à l'attention comme sélection et le *système exécutant* (*executing*) correspond à l'attention comme ressource.

III.A.1 Ressource attentionnelle

Les sciences cognitives postulent que l'action du cerveau est fonctionnellement équivalente à un ensemble de processus agissant sur des contenus (des représentations) ayant des formats. Les formats sensoriels incluent des attributs tels que la couleur, l'orientation ou le contraste. En tant que ressource, l'attention peut être allouée à un processus contrôlé (Schneider & Shiffrin, 1977) pour le faire agir sur un contenu. Au contraire, elle peut empêcher un processus automatique d'avoir lieu sur un contenu (Stroop, 1935). Elle peut aussi être partagée entre différents processus. L'allocation est contrôlée volontairement et la quantité de ressource est limitée. Dans cette thèse, j'utiliserai le terme *ressource attentionnelle* pour désigner cette forme d'attention. Le statut des ressources attentionnelles en tant que processus reste ouvert. Je considère qu'il s'agit d'un processus contrôlé car l'allocation des ressources est volontaire et a un coût que l'on peut mesurer dans les paradigmes de changement de tâche (Waszak, Hommel, & Allport, 2003). Le fait qu'un processus s'applique à d'autres processus plutôt qu'à un contenu pourrait constituer un problème qui serait simplement résolu en considérant la ressource attentionnelle comme un méta-processus (on parle aussi de processus centraux ou exécutifs).

III.A.2 Mécanisme sélectif de l'attention

En tant que mécanisme sélectif, l'attention peut être dirigée vers un espace du champ visuel en y sélectionnant tous les attributs (*attention spatiale*) ou dirigée vers une valeur d'un attribut (tels qu'une certaine couleur ou une certaine orientation) sélectionnée à tous les emplacements. Je parlerai dans ce dernier cas d'*attention d'attribut* (Treisman, 1988; Treisman & Gelade, 1980). Elle peut aussi sélectionner tout un objet (Duncan, 1984; Scholl, 2001)³⁴, indépendamment de sa position ou de ses attributs : il est ainsi plus difficile de faire une tâche sur deux attributs qui appartiennent à deux objets plutôt qu'au même objet. Dans cette thèse, j'utiliserai par défaut le terme *attention* comme raccourci d'attention comme mécanisme de sélection (spatiale, d'attribut ou d'objet) plutôt que comme ressource attentionnelle. Broadbent (1958) développe la théorie du filtre précoce de l'attention. Selon lui, seule une information structurale grossière est analysée précocement, l'attention bloquant la plupart de celle-ci, et n'en laissant passer qu'une petite partie pour un traitement de haut niveau. Certaines expériences montrent pourtant qu'un traitement de

³⁴ Dans les expériences que je vais présenter sur l'attention d'objet (Chong & Blake, 2006; Kamphuisen, van Wezel, & van Ee, 2007; Mitchell, Stoner, & Reynolds, 2004), je mets en doute le fait que les résultats s'appliquent vraiment à l'objet : il est presque toujours possible de considérer que l'attribut *orientation* (de la grille) et non l'objet (surface) est sélectionné dans ces expériences .

haut niveau est possible là où l'attention ne se porte pas (Moray, 1959), menant aux théories de filtre tardif, ou à une version allégée du filtre précoce, qui est la théorie de l'atténuation (Treisman, 1960). Selon cette dernière, le filtre ne fait qu'atténuer l'information non-sélectionnée, la rendant tout de même disponible en cas de besoin, par l'intermédiaire de mémoires sensorielles.

(a) Attention exogène

Posner, Nissen et Ogden (1978) développent le paradigme d'indication attentionnel qui permet de différencier les attentions spatiales endogène et exogène. Le paradigme est une tâche de détection de cible d'un côté ou d'un autre. Dans le cas de l'attention exogène (Reeves & Sperling, 1986), un indice périphérique est flashé avant la cible (Figure 22) soit du même côté (valide) soit de l'autre côté (invalide). Les temps de réaction sont mesurés plus courts dans les essais valides : L'attention a été involontairement attirée vers l'indice. Il existe en effet un ensemble de détecteurs périphériques très sensibles au mouvement (ou changements abrupts de luminosité que j'appellerai *perturbations*) fonctionnant en parallèle.

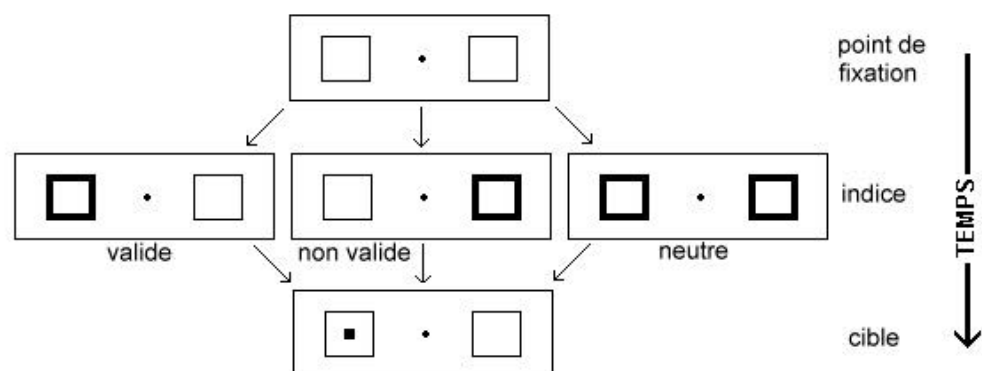


Figure 22 : Paradigme d'indication attentionnel avec indice périphérique. La figure montre les indices valides et invalides. La tâche porte sur la cible (présence-absence ou discrimination d'orientation). D'après Posner (1980).

(b) Attention endogène

Avec un indice central, qui est souvent une flèche pointant vers la position probable de la cible (dans 80% des cas), il est possible de mettre en évidence l'*attention endogène* (Nakayama & Mackeben, 1989). Dans ce cas, le sujet a intérêt à détourner volontairement son attention du côté indiqué. Il en résulte des temps de réaction plus courts pour les cas valides que pour les cas invalides qui ne sont pas retrouvés lorsque l'indice central ne prédit pas la position de la cible. Par extension, l'attention endogène regroupe toutes les formes de déplacement volontaire de l'attention tandis que l'attention exogène est involontairement dirigée, comme dans le pop-out ou lors d'une perturbation. L'attention endogène est un processus contrôlé qui demande des ressources

attentionnelles, tandis que l'attention exogène est un processus automatique. Je vais maintenant détailler les influences connues de ces formes d'attention sur la bistabilité.

(c) Effect of attentional selection on contrast appearance

At the perceptual level, attention enhances contrast sensitivity (Posner, 1980). It could happen by the way of signal enhancement, noise reduction or external noise reduction (reduction of signal for stimuli outside of attention)³⁵. A study (Carrasco, Ling, & Read, 2004) was not able to disentangle between these three options, but was able to show that attention was stimuli under attention have a higher contrast than stimuli outside of attention. They showed participants with two oriented Gabors, and asked the orientation of the lower contrast Gabor (exp. 3). One of the two was first given exogenous attentional focus with a peripheral cue. Participants responded more often the orientation of non-cued stimulus, demonstrating that they perceived the cued stimulus with higher contrast while ruling out different response biases (because the task is on orientation, not contrast and also because if participant would have a bias to do the task on stimulus under attention, he would respond more often on the lower contrast stimuli).

III.B Influence du contrôle volontaire, des ressources attentionnelles

Les données divergent sur le caractère automatique ou contrôlé des processus de maintien¹² et de renversement et sur la justesse de la théorie des coupures attentionnelles comme cause des renversements. Le contrôle volontaire de la bistabilité est possible en maintenant le percept choisi mais pas en supprimant le percept non-désiré.

III.B.1 Théorie attentionnelle des renversements

Pour von Helmholtz (1911), l'attention est le vrai moteur de la bistabilité. C'est la ressource attentionnelle (généralement associée à une tâche) qui maintient un stimulus dominant (le maintien serait donc un processus contrôlé). Les renversements (donc forcément issus d'un processus automatique) sont provoqués par une coupure involontaire dans le processus de maintien (cf.III.F.3 pour plus de preuves). Rock soutient une hypothèse inverse (et un peu vague) du rôle du contrôle volontaire : selon lui, il n'y a pas de renversement sans *intention* de renverser (Rock, Gopnik, et al., 1994; Rock, Hall, et al., 1994; Rock & Mitchener, 1992).

³⁵ See Carrasco and Ling, 2004 for references

Pastukhov et Braun (2007) se proposent de tester l'hypothèse de von Helmholtz en demandant aux observateurs de faire deux tâches en même temps : rapporter le percept en rivalité de plaid en mouvement et la direction du mouvement de points (Figure 23). La diminution des ressources attentionnelles (provoquant des coupures d'allocation) devrait augmenter le nombre de renversements d'après la théorie de von Helmholtz. Ils trouvent le résultat inverse (une diminution du taux de renversement).

Une étude avec un paradigme presque identique (mais en rivalité binoculaire) obtient le même résultat (Paffen, Alais, & Verstraten, 2006). Puisque moins de ressources sont disponibles pour rapporter la bistabilité, il est possible que les renversements aient lieu et ne soient simplement pas rapportés. L'expérience de Paffen et al. (2006) a apporté des données prouvant la facilité de rapporter un percept³⁶. Une autre expérience (Alais, van Boxtel, Parker, & van Ee, 2010) rapporte le même résultat en rivalité binoculaire avec une tâche auditive³⁷ (en contrôlant aussi la facilité des réponses), confirmant la nature centrale (intermodale) de la ressource attentionnelle.

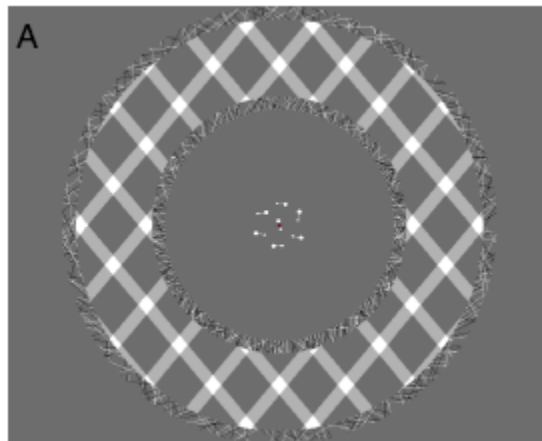


Figure 23 : Test de l'hypothèse attentionnelle de von Helmholtz. Stimulus utilisé pour la double tâche : la première tâche est de répondre à propos de la cohésion du plaid et la seconde tâche est de rapporter la direction du mouvement du groupe de points au centre. Figure issue de Pastukhov et Braun (2007).

³⁶ Ils utilisent pour cela une condition *replay* avec un rythme de renversement correspondant au rythme normal de l'observateur, et ceux-ci parviennent à les rapporter en gardant la même performance sur la tâche annexe.

³⁷ En rivalité d'orientation mais aussi visage-maison et avec le cube de Necker.

Or, une augmentation du rythme des renversements aurait impliqué un processus de maintien contrôlé et un processus de renversement automatique. L'inverse (processus de maintien automatique et de renversement contrôlé) prédit correctement une diminution des renversements par la diminution des ressources. Si les processus étaient tous deux automatiques ou contrôlés, une absence d'effet des ressources attentionnelles serait observée. Le caractère irrépessible implique lui-même deux possibilités : le processus de renversement est automatique ou le processus de maintien est contrôlé (et ce sont les coupures attentionnelles qui créent les renversements). Inversement, si le maintien était automatique et les renversements contrôlés, aucun caractère irrépessible ne serait observé. Le croisement de ces critères ne laisse aucune possibilité valide (cf.

Tableau 3) à moins d'accepter la théorie de Rock sur l'intention de renverser (d'après les données en section I.B.1, qui n'ont jamais été reproduites encore en rivalité binoculaire).

Tableau 3 : Statut des processus de renversement et maintien de percept. Tentative pour déterminer s'ils sont automatiques ou contrôlés. Le tableau montre les différentes prédictions pour le paradigme de double tâche ainsi que pour d'autres phénomènes.

		Processus de Maintien	
		Automatique	Contrôlé
Processus de Renversement	Automatique	Pas d'effet dans le paradigme de double tâche (faux)	Augmentation du rythme de renversements (faux)
	Contrôlé	Diminution du rythme des renversements (vrai) ; Absence du caractère irrépessible (faux)	Pas d'effet (faux)

III.B.2 Working memory load and reversals

Increasing working memory load with the Necker cube led to decreasing of reversals (Intaite et al, 2013, under review), isolating the effect of working memory load itself. This seems expected given that visual working memory is definitively involved in the Necker cube task or any visual task. However, other visual tasks did not lead to decrease in performance (errors or RT). See for example: (1) Stroop interference effects (de Fockert et al., 2001); (2) visual search task (Woodman, Vogel & Luck, 2001); (3) flanker task (Pratt et al., 2011); (4) flanker response-

competition task (with letters) (Lavie et al., 2004); (5) perceptual load task (Macdonald & Lavie, 2008).

III.B.3 Contrôle volontaire de la bistabilité

Par l'attention comme ressource (c'est-à-dire le contrôle volontaire), le rythme des renversements en rivalité peut être augmenté (Lack, 1971). Les résultats de Lack ont été confirmés et étendus (Meng & Tong, 2004) : un percept en particulier peut aussi être maintenu pour le cube de Necker ou la rivalité visage-maison. Le contrôle de la rivalité d'orientation est par contre très limité comparé aux autres stimuli. Les résultats de Meng et Tong (2004) ont été eux-mêmes confirmés par une étude indépendante (van Ee et al., 2005) ajoutant la rivalité d'inclinaison (Figure 24). De plus, le contrôle exercé sur le cube de Necker s'est révélé indépendant de la position de la fixation (Toppino, 2003), contrairement à une croyance répandue. Lack (1974, 1978) a aussi mesuré objectivement l'effet du contrôle volontaire en rivalité en mesurant la détectabilité de cibles flashées du côté contrôlé comparée au côté non-contrôlé et a trouvé des résultats concordants.

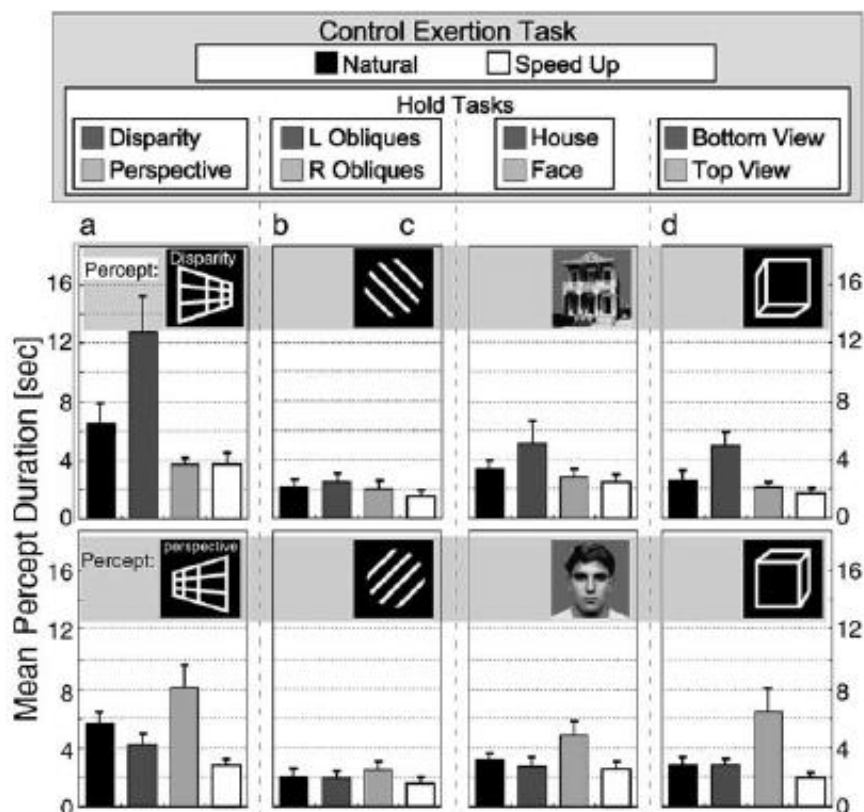


Figure 24 : Résultats d'une expérience de contrôle volontaire réussie, avec quatre stimuli : la rivalité d'inclinaison (a), la rivalité d'orientation (b) et de visage-maison (c) et le cube de Necker (d).

La première ligne indique les durées de phase d'un percept et la seconde de l'autre percept. Les quatre colonnes correspondent aux conditions normale, maintien d'un percept (celui dessiné sur le graphique), maintien de l'autre percept et augmentation du rythme des renversements. Figure issue de van Ee et al. (2005).

III.C Influence de l'attention exogène

L'attention exogène a un effet de courte durée, de l'ordre de quelques secondes et peut se porter sur l'objet.

Les perturbations (changements abrupts de luminance) ont un effet très fort en rivalité : l'œil perturbé devient automatiquement dominant (Breese, 1899; Grindley & Townsend, 1965; Duensing & Miller, 1979; Walker & Powell, 1979; Blake et al., 1998), même lorsque la perturbation est subliminale (Walker, 1975b). Cet effet est à la base de la facilitation flash continue et est lié au déploiement automatique de l'attention exogène spatiale. L'attention exogène d'attribut inclut le phénomène de pop-out (Treisman & Gelade, 1980). Un pop-out a lieu lorsqu'un élément est différent des autres éléments uniquement par un certain attribut (les autres éléments étant identiques quant à cet attribut). Le temps de détection est alors indépendant du nombre de distracteurs ou diminue avec ce nombre (Bravo & Nakayama, 1992), montrant qu'il n'y a pas de recherche sérielle³⁸. Ooi et He (1999) présentent un stimulus en rivalité dont l'un des éléments présente un pop-out dans un œil. Dès la présentation, le côté en pop-out domine pendant près de trois secondes mais pas au-delà.

Qu'est-ce qui est sélectionné par l'attention spatiale exogène ? S'agit-il d'un morceau de l'un des champs oculaires ou des objets présents dans cet espace, indépendamment de l'œil de présentation ? L'attention exogène peut être basée sur l'objet³⁴ : dans une expérience (Mitchell, Stoner, & Reynolds, 2004), deux surfaces en transparence (donc binoculaire) sont en rotation l'une sur l'autre et l'une d'elle est indiquée brièvement par une légère translation (ce qui attire l'attention exogène non pas spatialement, puisque les deux surfaces sont au même endroit, mais sur l'objet *surface*). Tout de suite après, les surfaces sont présentées en rivalité, une dans chaque œil. La surface indiquée sera dominante. Chong et Blake (2006) ont répliqué ce résultat avec un paradigme plus contrôlé, de même qu'une étude récente (Kamphuisen, van Wezel, & van Ee, 2007).

III.D Influence de l'attention endogène

L'attention endogène comme sélection spatiale ou d'objet est capable de maintenir un percept dominant pendant une courte durée.

Ooi et He (1999) ont montré clairement qu'un percept en rivalité pouvait être maintenu en y dirigeant l'attention spatiale endogène (comme processus de sélection). Un indice central

³⁸ Dans le cas d'une recherche sérielle, le temps de réaction augmente avec le nombre de distracteurs.

demande au sujet de porter son attention vers un côté où apparaît un point monoculaire (un point monoculaire apparaît de l'autre côté aussi). Un mouvement dans l'autre œil va ensuite essayer de perturber ce point (c'est-à-dire le faire disparaître), ce qui s'avère plus difficile du côté attendu que de l'autre côté. Chong et Blake (2006) ont étendu les résultats à la sélection basée sur l'objet en demandant aux sujets de suivre un réseau parmi deux réseaux en transparence. Les réseaux sont en rotation indépendante et le réseau à suivre est brièvement plus brillant. Après un certain temps de poursuite, les réseaux sont finalement présentés en rivalité, un dans chaque œil. Le résultat est que le réseau suivi domine sur l'autre.

Meng et Tong (2004) ont créé un stimulus intéressant, formé de dégradés de contraste de directions opposées dans chaque œil (Figure 25). Faire une saccade de gauche à droite favorise ainsi très largement le stimulus de l'œil gauche (et vice versa). Lorsque l'attention spatiale endogène se déplace de la même manière tandis que le regard reste fixe au centre, cela produit-il les mêmes effets qu'une saccade ? Les auteurs ont demandé à leurs sujets de faire cette tâche dans le but de contrôler le stimulus dominant et n'ont pas obtenu d'effet. Comment réconcilier ces résultats avec ceux d'Ooi et He (1999) et de Chong et Blake (2006) qui montrent que l'attention endogène spatiale peut aider au maintien de la dominance ? D'abord, l'attention comme ressource était ici probablement difficile à mettre en œuvre étant donné la force du stimulus³⁹ et les instructions spéciales (mélangeant attention endogène spatiale et contrôle volontaire). Je pense que l'effet de l'attention endogène spatiale est de courte durée (seul le premier percept a été étudié dans les deux études mentionnées) : Meng et Tong ayant enregistré des périodes d'une minute, les effets de sélection peuvent se moyenner avec les inhibitions de retour.

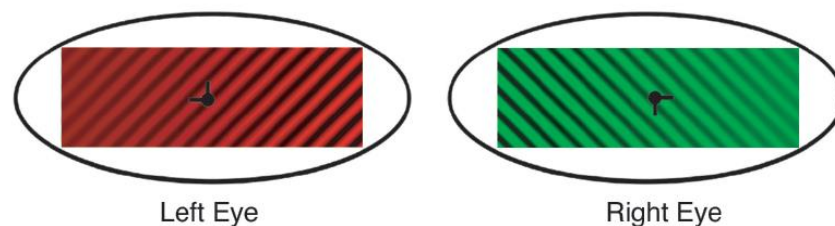


Figure 25 : Stimulus utilisé pour étudier l'effet du déplacement de l'attention spatiale endogène. Figure issue de Meng et Tong (2004).

Lorsque l'attention spatiale endogène est déplacée à une position en rivalité binoculaire, est-ce que les deux images monoculaires à cette position sont forcément sélectionnées ou seulement l'image dominante ? Une expérience (Yang, Hong, & Blake, 2010) montre que les deux images monoculaires sont sélectionnées. Le paradigme implique un visage invisible à cause de la

³⁹ Le rapport de contraste est de 9 à gauche et 0.11 à droite.

suppression flash continue ; l'attention spatiale endogène permet de restaurer l'adaptation à ce visage qui n'a normalement pas lieu sous suppression (cf. IV.G.2). Cela signifie que l'image supprimée est aussi sélectionnée par l'attention endogène.

III.E Liaison entre bistabilité et d'autres phénomènes attentionnels

La suppression bistable est comparable à une non-sélection attentionnelle. La principale différence réside dans l'inaccessibilité du percept supprimé par l'attention endogène.

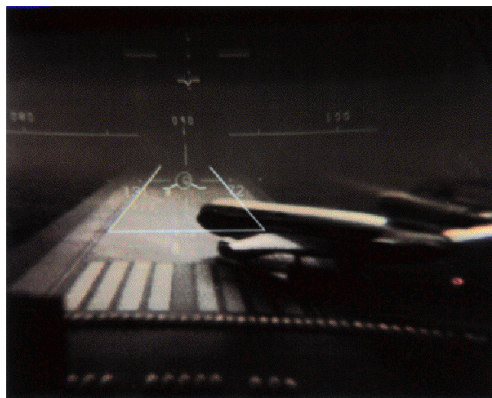
III.E.1 Suppression et attention

Il existe un parallèle entre la bistabilité et l'attention dans la mesure où les deux impliquent une sélection. Pour l'attention, la sélection se traduit par un bénéfice de performance dans une tâche de détection de cible mais aussi un coût pour les stimuli non-sélectionnés. De même en bistabilité, ce coût existe pendant la suppression. Nous avons vu les expériences montrant ce coût dans des paradigmes de détection de cibles (cf. II.B). Le contre-argument parfois avancé (Alais, van Boxtel, et al., 2010) est que le percept bistable ne peut être maintenu indéfiniment contrairement à la sélection attentionnelle. Pourtant, la sélection attentionnelle est toujours temporaire (à la fois pour l'exogène et l'endogène) avec un coût associé à son désengagement, l'inhibition de retour. Est-il possible que cette inhibition de retour soit la cause du renversement ?

III.E.2 Cécité inattentionnelle et cécité au changement

Il existe une importante littérature montrant que presque rien n'est perçu en dehors du focus attentionnel, à l'exception des signaux de mouvement. Elle est d'abord basée sur le phénomène de cécité au changement (Levin & Simons, 1997; O'Regan & Noë, 2002; Pashler, 1988; Rensink, 2002a, 2002b; Rensink et al., 1997; Simons, 2000; Simons & Ambinder, 2005; Simons & Levin, 1998; Simons & Rensink, 2005). Ainsi, d'importants changements de l'image ne sont pas perçus quand le changement a lieu au moment d'un écran blanc flashé (Rensink et al., 1997; Rensink, O'Regan, & Clark, 2000) ou au moment de perturbations (O'Regan, Rensink, & Clark, 1999) pourtant non-superposées au changement (*tâches de boues*), quand le changement a lieu entre plans de caméra (Levin & Simons, 1997) ou au moment d'un clignement des yeux (O'Regan, Deubel, Clark, & Rensink, 2000) et même au point de fixation. Le changement de casse (McConkie & Zola, 1979) ou de position (Bridgeman, Hendry, & Stark, 1975) entre deux fixations n'est pas non plus détecté, ni le changement de personne dans une interaction réelle avec un inconnu de la vie de tous

les jours (Simons & Levin, 1998). Même en l'absence de perturbation, les changements sont difficiles à détecter s'ils ne provoquent pas eux-mêmes de perturbation, lors de changements très lents par exemple (Simons, Franconeri, & Reimer, 2000). Ce que nous percevons dans le focus attentionnel est lié à la tâche (Triesch, Ballard, Hayhoe, & Sullivan, 2003) et est à l'origine de la cécité inattentionnelle (Figure 26) : quand l'attention est focalisée sur un aspect d'un stimulus, nous sommes presque aveugles au reste du stimulus (Haines, 1991; Mack & Rock, 1998; Rock, Linnett, Grant, & Mack, 1992; Simons & Chabris, 1999).



Haines, 1991. Ames Res. Center, NASA

Figure 26 : Cécité inattentionnelle : le pilote est concentré sur les éléments qu'il sait utiles à son atterrissage sur la piste (des lignes blanches et des lumières). Il est aveugle au reste, même si ces éléments superposent la piste. Figure issue de Haines (1991).

Lorsque nous regardons une figure sur un fond, il est possible que nous pensions à tort percevoir le fond de l'image, parce que nous pouvons facilement porter notre attention dessus si nécessaire : nous avons l'illusion de voir le monde de manière détaillée (O'Regan & Noë, 2002). Ainsi, lorsque le fond est en dehors de notre focus attentionnel (parce que le focus est sur la figure), nous ne le voyons pas plus qu'en rivalité, comme le montrent les expériences où une cible est flashée dans l'œil supprimé : la suppression n'est pas plus forte que ce qui est observé avec une cible flashée sur un fond contre une figure sans suppression. L'image de l'œil supprimé pourrait

donc simplement correspondre à une zone en dehors de l'attention mais qui n'est pas facilement accessible si nécessaire à la différence du fond derrière la figure. Le stimulus supprimé est-il vraiment inaccessible ? L'allocation des ressources attentionnelles pour contrôler le percept a lieu en augmentant la durée des phases du percept à maintenir, sans diminuer celles du percept à supprimer (van Ee et al., 2005). Celui-ci n'est donc pas accessible volontairement. L'image de l'œil supprimé reste par contre accessible par l'attention exogène (en cas de perturbations guidant l'attention endogène vers la zone dont la représentation doit être rafraichie).

III.F Influence de la tâche

La tâche peut influencer certains aspects visuels directement et la bistabilité par l'action motrice ou l'intention. L'utilité définie par la tâche affecte le déploiement de l'attention exogène spatiale et d'objet et l'amorçage du pop-out.

III.F.1 Influence motrice directe sur le percept bistable

Breese (1899) fut le premier à montrer que l'acte moteur pouvait influencer la rivalité (d'après Pettigrew, 2001) : avec des réseaux orthogonaux rouge et vert comme stimuli, il remarque que la contraction des poings, par exemple, augmente très fortement la dominance du réseau rouge. Certains travaux (Ishimura, 1995; Ishimura & Shimojo, 1994; Maruya, Yang, & Blake, 2007) rapportent que les réponses pour des stimuli bistables ambigus sur l'orientation du mouvement apparent sont biaisées par les mouvements non-visibles effectués par les mains du sujet (voir aussi Lalanne, 2006). Les auteurs appellent cela une *capture par l'action*, qui serait la conséquence d'une variation de la sensibilité visuelle dans la direction du mouvement intentionnel de la main. Wohlschläger (2000) a précisé les conditions qui permettent ce type d'amorçage et a confirmé que la simple pression d'une touche à droite ou à gauche était suffisante.

III.F.2 Influence de la tâche en vision

L'influence de la tâche a été montrée en perception visuelle à partir de la perception des visages (Schyns & Oliva, 1999). Les auteurs ont demandé aux sujets de faire différentes tâches sur des visages comme déterminer le genre, l'expressivité ou la nature de l'émotion exprimée. Les visages présentés sont en fait des visages hybrides (Figure 27) composés d'un certain visage dans les hautes fréquences et d'un autre visage dans les basses fréquences (par exemple, une femme et un homme ou un visage neutre et un autre en colère). Les résultats montrent que les sujets utilisent

plutôt une bande de fréquence qu'une autre en fonction de la tâche. Pour les jugements d'expressivité, les hautes fréquences sont préférées alors que pour l'identification de l'émotion, les basses fréquences sont privilégiées. Par contre, aucune fréquence n'est privilégiée dans la tâche de genre. Cette modification de l'utilisation des fréquences s'avère durable puisque lorsque la tâche change, l'utilisation reste biaisée. Le rôle de cette modification pourrait être l'augmentation de la performance. Si tel était le cas, la performance des sujets devrait être meilleure à la tâche quand on leur administre les fréquences privilégiées uniquement. Pour toutes les tâches, les observateurs sont meilleurs avec les basses fréquences, ce qui écarte partiellement ce rôle.

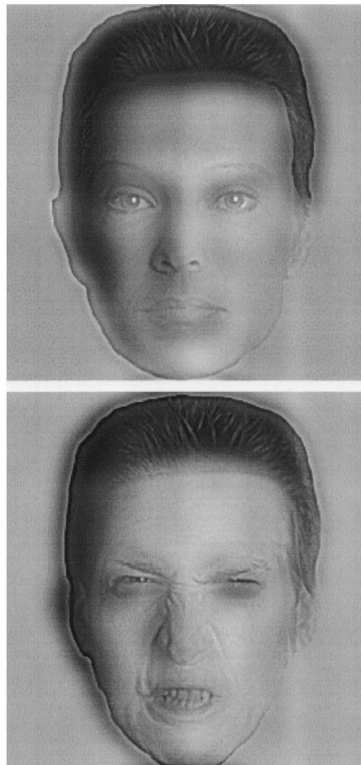


Figure 27 : Visages hybrides mélangeant en haut, une femme neutre dans les hautes fréquences et un homme en colère dans les basses et en bas, un homme en colère dans les hautes fréquences et une femme neutre dans les basses. Pour voir les visages des basses fréquences, s'éloigner de plusieurs mètres. Figure issue de Schyns et Oliva (1999).

III.F.3 Influence de la tâche en vision bistable

En rivalité binoculaire d'orientation, von Helmholtz (1867, p. 498) rapporte qu'une tâche soutenue sur le stimulus, comme compter le nombre de barres ou estimer la distance qui les sépare, permet d'empêcher les renversements. De même, si un texte est présenté contre une image, lire le texte le maintient dominant. Une étude a tenté de vérifier cela plus systématiquement (Chong, Tadin, & Blake, 2005) en demandant aux observateurs de faire une tâche sur l'un des réseaux en rivalité (compter le nombre de changements de fréquence spatiale). Les durées de phase de ce

réseau sont alors plus longues (dans une proportion équivalente à un doublement du contraste). Celles de l'autre réseau sont inchangées, ce qui ressemble au résultat de contrôle volontaire et pourrait parfaitement lui être attribué. De plus, les changements de fréquence spatiale créent un mouvement dans un œil uniquement, une perturbation qui attire l'attention exogène. Il est donc difficile ici de séparer les effets des différentes formes d'attention.

Une autre expérience (Rock, Hall, et al., 1994) présente une figure ambiguë en rivalité (la figure dans un œil et des lignes dans l'autre œil). La tâche est soit de rapporter la multi-stabilité, soit de rapporter uniquement la bistabilité de la figure ambiguë sans rapporter la rivalité. Dans le premier cas, aucun renversement de figure ambiguë n'est rapporté au contraire du second. Rock et ses collègues concluent au rôle de l'intention dans les renversements mais il s'agit aussi d'un effet de la tâche.

III.F.4 Influence de l'utilité dans le déploiement de l'attention

(a) Utilité et attention spatiale

Un stimulus ou un percept sera défini comme *utile* pour une tâche quand il permet d'augmenter les performances à cette tâche. Lorsqu'une zone de l'espace s'avère utile pour la tâche, est-ce que l'attention peut être automatiquement et implicitement dirigée vers cette zone? C'est ce que montre une étude (Lambert, Naikar, McLachlan, & Aitken, 1999) dans un paradigme d'indication. Les indices sont deux lettres périphériques aux deux positions possibles de la cible (Figure 28). L'une des lettres (disons W) prédit la position de la cible dans 80% des cas et est donc plus utile que l'autre (lettre S). L'attention exogène ici, devrait être partagée de manière égale entre les deux lettres qui provoquent une perturbation. Bien que les sujets ne se rendent pas compte de la relation cible-identité de la lettre, les essais où la cible est à la position favorisée (W) sont plus rapides que les essais à l'autre position (S) avec un maximum d'effet pour un SOA indice-cible de 150 ms et une inhibition de retour après 600 ms. Le déploiement de l'attention spatiale peut donc être influencé par l'utilité définie par la tâche.

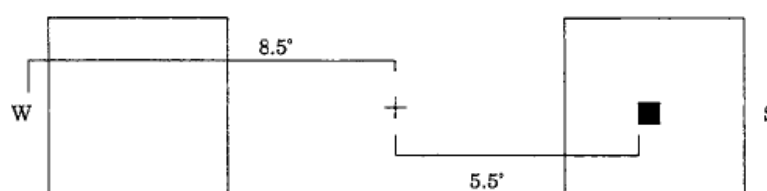


Figure 28 : Stimulus utilisé dans l'expérience de Lambert et al. (1999). La cible apparaît dans un carré à droite ou à gauche. Elle est précédée d'indices périphériques des deux côtés, deux lettres (ici un W et un S), dont l'une est associée avec la cible dans 80% des cas.

(b) Utilité et attention d'objet

Le déploiement implicite de l'attention vers la partie utile d'un objet peut aussi être appris avec un paradigme d'indication attentionnel (Kristjánsson, Mackeben, & Nakayama, 2001). Le déploiement est vraiment basé sur l'objet : il peut être guidé vers une de ses parties définie spatialement (e.g. la droite de l'objet, peu importe la position de l'objet) ou par des attributs comme la couleur (e.g. la partie rouge de l'objet quelle que soit cette partie) ou la forme (Kristjánsson & Nakayama, 2003). Par contre, le système échoue pour apprendre les parties utiles lors de conjonctions d'attributs (par exemple, la partie utile est la droite de l'objet lorsqu'il est rouge et la gauche lorsqu'il est vert). L'apprentissage est très rapide (incrémentiel, apparent après quatre répétitions, avec un maximum après huit répétitions). L'effet présente un pic pour un SOA de 200 ms entre cible et indice.

(c) Utilité et amorçage du pop-out

L'amorçage du pop-out (Bravo & Nakayama, 1992; Maljkovic & Nakayama, 1994) constitue un phénomène intéressant pour comprendre de quelle manière surprenante l'attention exogène sélective est déployée. Dans une tâche où l'élément étrange (i.e. différent des autres) doit être détecté, le temps de réaction est meilleur quand l'attribut étrange⁴⁰ est répété. Le gain croît de manière incrémentale dès la première répétition et prend en compte les sept derniers essais. Ainsi, les observateurs peuvent implicitement apprendre où déployer efficacement l'attention exogène dans une tâche de pop-out à partir de l'histoire récente. Il se transfère complètement entre les yeux et est implicite. Le gain est aussi basé sur les précédentes positions de l'élément étrange, avec un coût à la position des distracteurs (Maljkovic & Nakayama, 1996). Une autre série d'expériences (Maljkovic & Nakayama, 2000) a déterminé que l'unité de l'histoire prise en compte est bien l'essai (plutôt que le temps) avec un événement supprimant le précédent dans une mémoire.

Deux études plus récentes (Fecteau, 2007; Kristjánsson, 2006) ont montré que la tâche en cours définit l'attribut vers lequel l'attention exogène pop-out va être dirigée. La procédure de

⁴⁰ L'attribut étrange peut être une certaine couleur ou une certaine fréquence spatiale.

l'expérience de Fecteau implique deux éléments étranges, l'un par la forme, l'autre par la couleur (Figure 29). Le bénéfice de répéter la couleur de la cible n'a lieu que si l'on demande aux sujets de faire la tâche sur la couleur (et de même pour la forme). L'utilité définie par la tâche explique donc l'amorçage du pop-out.

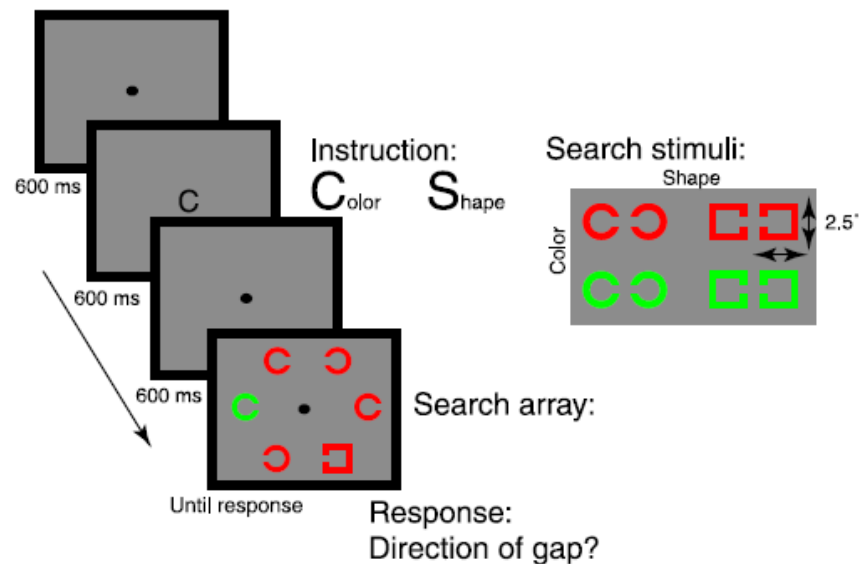


Figure 29 : Procédure permettant de montrer l'importance de la tâche dans l'amorçage du pop-out. Figure issue de Fecteau (2007).

IV. Adaptation, mémoire et bistabilité

IV.A Adaptation et bistabilité

L'adaptation semble jouer un rôle important pour la bistabilité. L'adaptation change la dominance des stimuli bistables, même lorsque les stimuli adaptants sont présentés très brièvement. Facilitation et suppression flash sont des phénomènes différents de l'adaptation.

Le phénomène d'adaptation peut être décrit comme une contingence négative à travers plusieurs présentations successives d'un stimulus : plus le stimulus est présenté, moins les observateurs le perçoivent à nouveau. Lorsque je parle d'*adaptation* dans cette thèse, je fais référence au phénomène observé et non aux mécanismes qui lui donnent naissance⁴¹. Si la bistabilité est une compétition entre des représentations qui s'inhibent entre elles, un mécanisme

⁴¹ Le terme est aussi parfois utilisé (mais jamais dans cette thèse) pour référer à un effet de *mémoire* qui est l'inverse de l'adaptation : plus le stimulus est présenté, plus les observateurs le perçoivent à nouveau.

d'adaptation peut être nécessaire pour déclencher un renversement. En bistabilité, lorsqu'un stimulus peut être vu de deux manières différentes, percevoir l'une des interprétations va rendre sa perception moins probable aux présentations successives (Gepshtein & Kubovy, 2005, e.g. pour les grilles de points bistables). De même, quand une version non-ambigüe de l'une des interprétations est présentée, cette interprétation est vue moins souvent, lorsque le stimulus est présenté ensuite dans sa version ambigüe. Cela a été montré par exemple, avec une figure ambigüe bistable figure/fond après adaptation à la couleur du fond (Hochberg, 1950), avec l'escalier de Schröder, avec la sphère ambigüe en rotation après adaptation à une version désambiguïsée par disparité (Harris, 1980; Nawrot & Blake, 1991), avec la fenêtre d'Ames après adaptation à un rectangle ou à un trapèze (Long & Toppino, 1994) ou avec des objets ambigus, suite à un morphing entre plusieurs objets, après adaptation à ces mêmes objets (Daelli, van Rijsbergen, & Treves, 2010). En rivalité binoculaire, présenter un réseau pendant une minute dans un œil diminue la dominance de cet œil par la suite (Blake & Overton, 1979). En plus de l'adaptation, un phénomène se surajoute : la suppression flash (Wolfe, 1984), qui est la suppression de l'image d'un œil lorsque le stimulus y est présenté un peu avant l'image de l'autre œil. Il ne s'agit probablement pas d'adaptation car le phénomène est plus souvent une facilitation (Brascamp, Knapen, Kanai, van Ee, & van den Berg, 2007). Tout dépend de l'énergie du stimulus : pour des énergies hautes (fort contraste, durée longue), un phénomène de suppression flash a lieu et une facilitation flash pour des énergies basses. Ces suppressions et facilitations ont lieu aux niveaux monoculaire et binoculaire (orientation) et s'additionnent (Brascamp et al., 2007).

Mieux comprendre le phénomène d'adaptation permet de mieux comprendre les mécanismes de la bistabilité. De manière générale, l'adaptation est un phénomène très étudié en dehors du cadre des figures ambigües et de la bistabilité. Il a d'abord été montré à travers les effets consécutifs qui ont permis d'avancer la première théorie explicative de l'adaptation.

IV.B Adaptation et effets consécutifs

A travers les effets consécutifs, l'adaptation a d'abord été comprise comme reflétant l'existence de canaux spécifiques qui se fatiguent pour des causes physiologiques.

IV.B.1 Théorie des canaux : Exemple de l'effet consécutif de fréquence spatiale

Dans l'effet consécutif de fréquence spatiale, un Gabor d'une certaine fréquence spatiale est présenté pendant une longue durée (phase d'adaptation avec le stimulus *adaptant*). Un autre Gabor, de fréquence spatiale proche du premier et présenté immédiatement après lui (stimulus

test, adapté), est alors perçu avec une fréquence spatiale qui n'est pas la sienne (Blakemore & Campbell, 1969a). Sa fréquence est perçue comme plus éloignée de la fréquence du Gabor adaptant. De plus, le seuil de détection au contraste du Gabor adaptant augmente (Blakemore & Campbell, 1969b) de manière spécifique à l'orientation et à la fréquence spatiale de ce Gabor (Greenlee & Heitger, 1988). Ces observations ont mené à la théorie des canaux (Blakemore & Sutton, 1969). Selon elle, le système visuel appréhende les grandeurs perceptives des stimuli (e.g. l'orientation, la fréquence spatiale) par l'intermédiaire de canaux spécifiques à une valeur de cette grandeur. Un stimulus stimule tous les canaux selon un profil gaussien, centré sur son canal spécifique. Dès qu'il stimule les canaux, ceux-ci commencent à diminuer leur réactivité proportionnellement. Par exemple, un Gabor de fréquence 3 cycles par degré (cpd) stimule et adapte principalement le canal spécifique à 3 cpd : les canaux proches sont moins adaptés. La fréquence finalement perçue est la moyenne des réponses des canaux pondérée par la valeur que code chaque canal. Après adaptation, lorsqu'un Gabor de fréquence proche mais plus haute est présenté, la moyenne pondérée est plus haute que la fréquence réelle du Gabor (Figure 30).

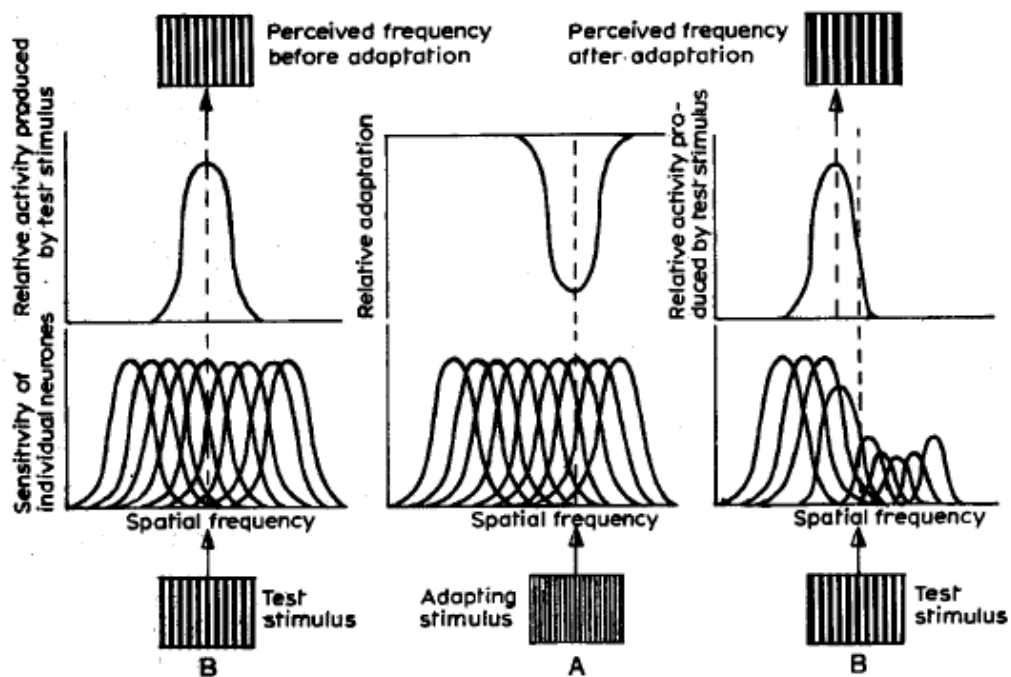


Figure 30 : Illustration de l'adaptation dans la théorie des canaux. Dans le panneau de gauche sont représentés le stimulus test (en bas), la sensibilité des canaux au stimulus avant adaptation (au milieu-bas), leur réponse au stimulus (au milieu-haut), ainsi que le perçue obtenu (en haut). Dans le panneau du milieu, dans le même ordre sont représentés le stimulus adaptant, la sensibilité et le niveau d'adaptation. Le panneau de droite est identique au panneau de gauche, mais après adaptation, la sensibilité des canaux est réduite autour de la fréquence adaptante. La réponse des canaux est décalée vers la gauche, ce qui modifie le perçue (effet consécutif). Figure issue de Mollon (1977).

IV.B.2 Théorie de la fatigue neuronale

Dans les années 70, le phénomène d'adaptation est expliqué par la *fatigue neuronale* ou *satiété* (Köhler & Wallach, 1944; Maffei, Fiorentini, & Bisti, 1973; Mollon, 1977). La théorie de fatigue neuronale est une variante de la théorie des canaux qui identifie lesdits canaux avec des populations de neurones répondant préférentiellement à une valeur d'une grandeur perceptive (Barlow & Hill, 1963). Elle affirme que l'adaptation est un phénomène avant tout physiologique : les neurones diminuent leur réponse à cause de limitations biologiques, comme une incapacité biophysique à renouveler le stock de neurotransmetteurs nécessaire à une activation prolongée. Cette théorie a été pendant longtemps la principale théorie explicative de l'adaptation. Nous allons voir comment elle semble expliquer une grande partie des données sur les effets consécutifs.

IV.C Intérêts de la théorie de la fatigue neuronale

La théorie de la fatigue neuronale et ses variantes comme la théorie du codage par traitements opposés, permettent d'expliquer la plupart des données sur les effets consécutifs, notamment la présence ou l'absence de paradoxe de distance. Finalement, de nouvelles données viennent changer notre compréhension des effets consécutifs par la présence de nouveaux paradoxes de distance.

IV.C.1 Paradoxe de distance

La fatigue neuronale appliquée à la théorie des canaux permet d'expliquer un phénomène important appelé *paradoxe de distance* (Mollon, 1974, 1977). Dans l'effet consécutif de fréquence spatiale, par exemple, aucun effet consécutif (en dehors des mesures de sensibilité) n'est trouvé pour la fréquence spatiale exacte du Gabor adaptant. Il est nécessaire de présenter un Gabor de fréquence légèrement différente : c'est le paradoxe de distance. Ce paradoxe est observé pour l'effet consécutif de fréquence spatiale, d'orientation (Gibson & Radner, 1937a) et pour certains effets consécutifs dans d'autres modalités comme celui de localisation auditive (Taylor, 1962) ou de température (Taylor, 1971). Pourtant, la théorie de la fatigue des canaux explique très bien le paradoxe, grâce à la symétrie des canaux (Köhler & Wallach, 1944) : la fatigue neuronale adapte autant les canaux de valeur plus faible que les canaux de valeur plus forte, la moyenne pondérée annule donc l'adaptation. Dans la suite de cette thèse, je rassemblerai ces effets consécutifs dans un premier groupe pour bien les différencier d'un deuxième groupe d'effets consécutifs qui ne sont pas soumis au paradoxe de distance et qui vont donc s'expliquer différemment (Tableau 4).

IV.C.2 Effets consécutifs sans paradoxe de distance

Certains effets consécutifs ne présentent pas de paradoxe de distance comme ceux de courbure (Gibson, 1933), de mouvement (Addams, 1834; Wohlgemuth, 1911) ou de couleur (cf. Tableau 4, groupe II). Pourtant, une simple variante de la théorie des canaux et de la fatigue neuronale permet d'expliquer ces cas particuliers. Ils peuvent l'être par une série de continuums sensoriels bipolaires, c'est-à-dire, qui incluent un zéro entre deux extrêmes (Gibson, 1937). Deux canaux sont en jeu car l'un code pour les valeurs entre le zéro et le premier extrême et l'autre pour les valeurs entre le zéro et l'autre extrême. Finalement, la valeur perçue est la différence de ces deux canaux (ce qui permet de joindre les deux canaux sur un même continuum). Les canaux sont donc en opposition et l'adaptation correspond à la diminution de la réactivité d'un des canaux, créant un déséquilibre. Il s'agit de la théorie du codage par *traitements opposés* (Sutherland, 1961).

Le type de codage que cette théorie impose au groupe II est différent du codage utilisé dans le groupe I. Pour la fréquence spatiale par exemple (groupe I), un codage par la place est normalement réalisé. Cela signifie que la valeur perçue sur le continuum sensoriel (fréquence spatiale plus ou moins haute) est dépendante du canal en jeu : un canal code pour une place sur le continuum (donc pour une fréquence spatiale) et sa fréquence de réponse représente le degré de certitude. Pour les continuums bipolaires, un codage par la fréquence a lieu sur deux canaux. Un codage par la fréquence signifie qu'une valeur sur le continuum n'est pas représentée par un canal propre mais par la fréquence de réponse d'un canal (plus le canal répond, plus la valeur codée est haute dans le continuum). Je vais illustrer cette théorie à travers deux exemples : les images consécutives et l'effet consécutif de mouvement.

Tableau 4 : Catégorisation des effets consécutifs en deux groupes, adapté de Mollon (1977). Au contraire du groupe I, le groupe II est caractérisé par un point zéro sur le continuum perceptif qui correspond à l'absence de la grandeur (le mouvement ou la couleur peuvent être absents, mais pas la fréquence spatiale ou la température).

	Groupe I	Groupe II
Paradoxe de distance	Oui	Non
Explication	Théorie des canaux	Bipolarité : théorie du codage par traitements opposés (couplage de canaux opposés)
Continuums perceptifs	Fréquence spatiale, orientation d'un contour, localisation auditive	Température, teinte d'une couleur, courbure d'un contour, mouvement, luminosité
Codage	Place	Fréquence de réponse

IV.C.3 Exemple des images consécutives

La couleur semble par exemple présenter deux continuums perceptifs, qui peuvent être décrits par leurs valeurs extrêmes : le rouge-vert et le jaune-bleu. Ainsi, l'intensité du rouge est codée par la fréquence de réponse de neurones sensibles aux lumières de grandes longueurs d'onde (premier canal ; ces neurones sont par exemple les *centre L+ / pourtour M-* ou les *centre M- / pourtour L+*) et l'intensité du vert par des neurones sensibles aux faibles longueurs d'onde (les *centre M+ / pourtour L-* ou les *centre L- / pourtour M+*). L'effet consécutif de couleur (ou image consécutive) est produit en présentant une surface de couleur (par exemple, rouge) pendant 30 secondes. Le canal « rouge » diminue sa réactivité durablement mais pas le canal « vert ». Une surface blanche est ensuite perçue comme verte à cause de ce déséquilibre, et la même surface rouge est perçue comme moins rouge (pas de paradoxe de distance). Il est possible de mesurer cet effet par la quantité de rouge qu'il est nécessaire de présenter à la place d'une surface blanche afin qu'elle soit perçue comme blanche. Rouge et vert sont donc sur le même continuum car une certaine intensité de teinte rouge est équivalente à une certaine intensité négative de teinte verte.

IV.C.4 Exemple des effets consécutifs de mouvement

Pour le mouvement d'un stimulus, le mouvement en direction « vers le haut » est codé dans un canal par sa fréquence de réponse et la direction « vers le bas » dans un autre canal. La vitesse

perçue le long de l'axe haut-bas est la différence de ces réponses. Dans l'effet consécutif de mouvement⁴² (Mather, Verstraten, & Anstis, 1998; Wohlgenuth, 1911), des points en mouvement vers le haut (par exemple) sont présentés pendant 30 secondes. Le canal « vers le haut » diminue progressivement sa réponse. Les mêmes points statiques sont alors perçus comme en mouvement vers le bas, et les mêmes points en mouvement vers le haut sont perçus comme moins rapides (pas de paradoxe de distance). Les deux canaux forment donc un continuum sensoriel par différence. Le paradoxe de distance n'est pas observé justement parce que la différence des deux canaux importe. Cela signifie aussi qu'il y a un continuum perceptif pour chaque couple de directions opposées.

Pourtant, cette théorie est en partie inexacte. Par exemple, la théorie rend compte des effets consécutifs de mouvement, même en transparence (Anstis, Verstraten, & Mather, 1998; Verstraten, Fredericksen, & Van De Grind, 1994), mais pas de la perception des mouvements en transparence eux-mêmes. L'effet consécutif de vitesse⁴³ (Thompson, 1976) pose aussi problème. Il s'agit d'une variante de l'effet consécutif de mouvement pour laquelle la direction du test est la même que le stimulus adaptant mais la vitesse de test n'est pas une vitesse nulle. Dans ce cas, un étrange phénomène de répulsion à la vitesse est observée pour les vitesses assez grandes (Thompson, 1981) : les vitesses test dans la même direction que le stimulus adaptant, mais plus rapides, sont perçues comme encore plus rapides et celles dans la direction opposée (pas trop petites) sont perçues comme moins rapides (Figure 31). Pour expliquer ces données, il faut intégrer une série de canaux sensibles à chaque vitesse, pour chaque direction de mouvement et ceux-ci doivent préférer des vitesses faibles (Martínez Rach, Martínez Verdú, Grzywacz, & Balboa, 2005; Stocker & Simoncelli, 2006a; Weiss & Adelson, 1998).

Pourtant, si les théories des canaux et du codage par traitements opposés sont encore massivement acceptées dans la communauté scientifique, la théorie de la fatigue neuronale a subi des attaques qui lui ont été fatales et que je vais détailler maintenant.

⁴² Attention, l'effet consécutif de mouvement (test statique) est différent de l'effet consécutif de direction de mouvement (test variant sa direction de mouvement, mais pas sa vitesse).

⁴³ Appelé aussi *effet consécutif dynamique* (test variant sa vitesse mais pas sa direction, excepté son signe).

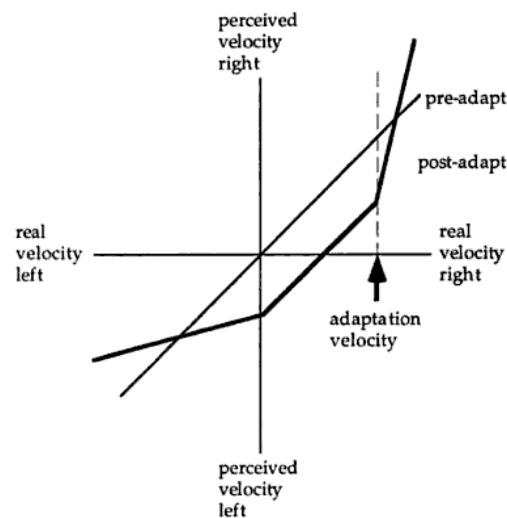


Figure 31 : Effet consécutif de vitesse. Après adaptation à un mouvement dans une certaine direction avec une vitesse indiquée par la flèche, un mouvement dans le même axe mais avec une vitesse différente est présenté. Figure issue de Mather et al. (1998).

IV.C.5 De nouvelles données sur les paradoxes de distance

Dès sa découverte (Gibson & Radner, 1937b), l'effet consécutif d'orientation a été envisagé comme un effet consécutif particulier : celui-ci présente en effet un paradoxe de distance non-conventionnel. L'effet est bien nul lorsque l'angle entre les orientations adaptante et test vaut zéro, est maximal pour un angle de 20° , faible pour un angle de 45° (effet direct) mais s'inverse légèrement entre 45° et 90° (effet indirect). Les mêmes paradoxes et effet indirects sont par la suite observés avec la couleur (Webster & Mollon, 1991, 1994). Finalement, dans les années 90, des mesures de l'effet consécutif de direction de mouvement apparaissent. Pour observer cet effet, il faut adapter à une direction de mouvement mais tester avec une direction différente de mouvement et de même vitesse : des effets de répulsion et attraction en fonction de l'angle adaptation-test sont alors observés. Il présente donc un paradoxe de distance, et un effet indirect similaire à celui trouvé pour l'orientation (Schrater & Simoncelli, 1998).⁴⁴ La similarité entre orientation, couleur et mouvement a amené certains auteurs à utiliser les mêmes représentations (Clifford, 2002). Lorsque les réponses aux canaux sensibles aux directions sont représentées sur un graphique circulaire, la direction finalement perçue pourrait être la moyenne circulaire de toutes les réponses (Mather, 1980).

⁴⁴ First paper for direction of motion adaptation : Levinson and Sekuler, 1976; Adaptation alters perceived direction of motion - Vis. Res., 16, 779-781

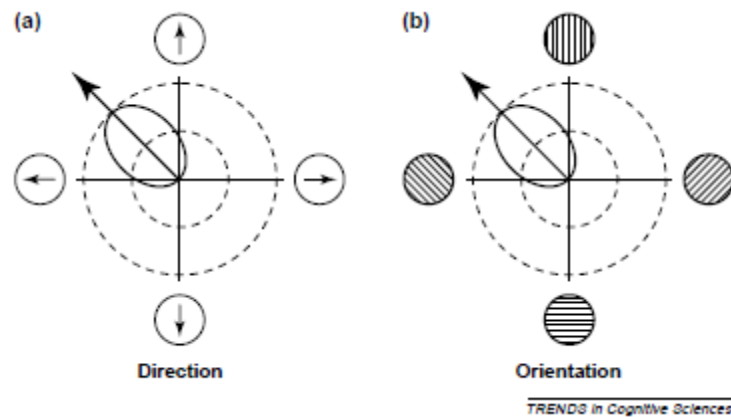


Figure 32 : Représentation circulaire des directions de mouvement (a) et des orientations (b). En (b), chaque orientation est opposée à l'orientation orthogonale. Le graphique représente les réponses de chaque canal. Figure issue de Clifford (2002).

L'effet consécutif de direction et son paradoxe de distance sont modélisés de la manière suivante : la sensibilité des canaux près de l'orientation adaptante est diminuée. L'effet indirect est produit en diminuant la sélectivité des canaux codant pour les directions orthogonales (Clifford, Wyatt, Arnold, Smith, & Wenderoth, 2001; Clifford, Wenderoth, & Spehar, 2000). De même, pour l'attribut orientation, les orientations opposées (c'est-à-dire orthogonales, Figure 32) peuvent être placées aux diamètres d'un cercle représentant les réponses des canaux spécifiques aux orientations (Clifford et al., 2001; Clifford, 2002; Clifford et al., 2000). L'orientation perçue est alors la moyenne circulaire des réponses des canaux sur le cercle (Clifford, 2002). Cette nouvelle représentation explique donc les paradoxes de distance tout en utilisant un codage par traitements opposés. Les groupes I et II existent toujours mais ce qui les caractérise n'est plus l'absence de zéro ou non sur le continuum mais la circularité de sa représentation.

Bien que tentante, l'utilisation de la moyenne circulaire semble pourtant erronée : si tel était le cas, comment expliquer la perception d'un simple plaid ou de deux mouvements en transparence dans des directions opposées ? Les composantes de ces stimuli étant codés sur le même axe, la moyenne circulaire serait nulle. Il est plus probable que seuls les pics d'activité soient perçus.⁴⁵

⁴⁵ Une prédiction de cette possibilité est que l'effet consécutif de direction est nul lorsque le test et l'adaptant ont la même direction d , car sa mesure moyenne est nulle : elle correspondrait à la moyenne de percepts bistables entre les directions $(d+e)$ et $(d-e)$, avec e l'effet consécutif réel.

Il existe cependant des données physiologiques qui semblent en accord avec la fatigue neuronale (hyperpolarisation avec une constante de temps de l'ordre de la seconde) : cf. (McCormick & Williamson, 1989).

IV.D Défauts de la théorie de la fatigue neuronale

L'hypothèse de la fatigue neuronale ne peut pas expliquer le phénomène de stockage et les données en faveur du gain de contraste. Il est donc nécessaire de la remplacer ou de la compléter.

IV.D.1 Phénomène de stockage

Le phénomène de *stockage* (Wohlgemuth, 1911) correspond à l'étonnante propriété qu'ont les effets consécutifs de ne pas disparaître en l'absence de stimulation visuelle (par exemple, lorsque les yeux sont fermés pendant une longue période, après la phase d'adaptation). Pour l'effet consécutif de mouvement, si les yeux ne sont pas fermés mais que n'importe quel stimulus est présenté à la place, le stockage reste très fort, à près de 75% (Thompson & Wright, 1994). Même en présence d'un mouvement orthogonal à la direction adaptée, l'effet de stockage a lieu (Verstraten, Fredericksen, Grüsser, & Van de Grind, 1994). Le stockage existe aussi pendant plusieurs minutes dans les effets consécutifs des visages (McKone, Edwards, Robbins, & Anderson, 2005).

Le stockage rend très improbable la théorie de la fatigue neuronale, car les neurotransmetteurs ont tout le temps de se reconstituer pendant la période de stockage, et ne constituent donc pas le limitant.

IV.D.2 Gain de réponse et gain de contraste

Si les neurones se fatiguent physiologiquement, il doit être possible de mesurer cette fatigue par des études électro-physiologiques. Il est alors attendu certaines modifications de la courbe de réponse du neurone en fonction du contraste (Figure 33B). Après adaptation, la réponse maximale qu'un neurone peut donner à un certain contraste, est diminuée dans le cas de la fatigue neuronale : c'est le *gain de réponse*. De nombreuses études rapportent cet effet chez le singe ou chez le chat (Kohn & Movshon, 2003; Movshon & Lennie, 1979).

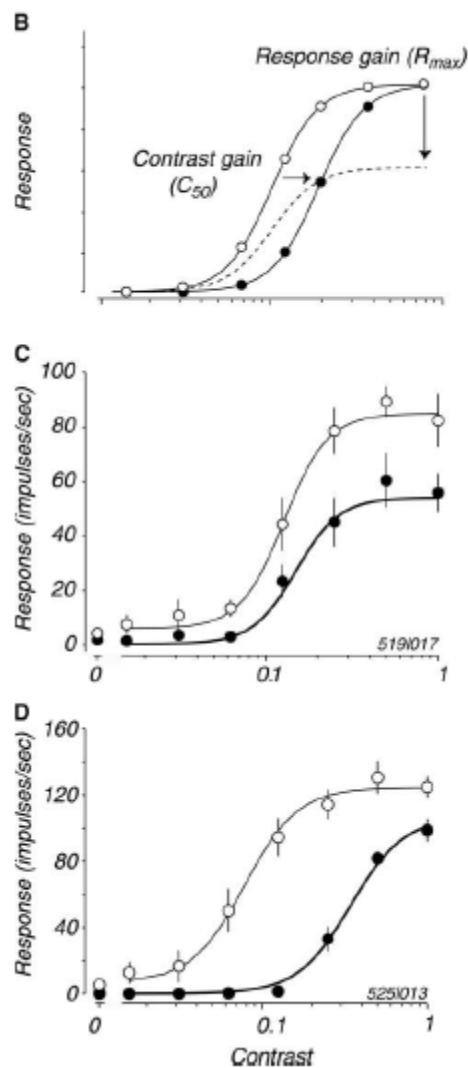


Figure 33 : Courbe de réponse d'un neurone de MT chez le macaque en fonction du contraste, avant (cercles blancs) et après adaptation à un mouvement (cercles noirs). Le neurone en C présente un gain de réponse (son amplitude est diminuée) tandis que le neurone en D présente un gain de contraste (sa courbe se déplace vers la droite). Figure issue de Kohn et Movshon (2003).

Un déplacement latéral de la courbe de sensibilité du neurone au contraste peut aussi être observée (Figure 33B) : appelée *gain de contraste*, cette modification est difficilement explicable par une fatigue neuronale. Le gain de contraste est observé en V1 après adaptation à des Gabors orientés (Movshon & Lennie, 1979; Ohzawa, Sclar, & Freeman, 1982, 1985) mais pas dans le corps genouillé latéral (Ohzawa et al., 1982, 1985). Il est observé aussi en MT après adaptation à des Gabors en mouvement dans la direction préférée de neurones (Kohn & Movshon, 2003). Dans cette dernière étude, différents neurones se comportent différemment : ils montrent soit un gain de réponse (Figure 33C), soit un gain de contraste (Figure 33D).

Les mesures psychophysiques confirment le gain de contraste (Wilson & Humanski, 1993) : par exemple, les seuils de discrimination au contraste diminuent aux contrastes forts, après

adaptation (à fort contraste), mais augmentent paradoxalement aux contrastes faibles (Greenlee & Heitger, 1988), ce qui est prédit avec un gain de contraste mais pas un gain de réponse.

Le gain de contraste s'explique beaucoup plus facilement par un recalibrage du neurone que par une fatigue : ses propriétés se modifient pour éviter la saturation qui a lieu aux extrêmes de la courbe de réponse au contraste, une stratégie appelée *contrôle de gain*.

De plus, certains neurones visuels ne s'adaptent pas, comme par exemple, dans le corps genouillé latéral (Ohzawa et al., 1982, 1985). La fatigue neuronale n'est donc pas une limitation imposée par la physiologie du neurone elle-même puisque des neurones sans fatigue existent bien. Ainsi, même si la fatigue neuronale peut jouer un rôle partiel dans l'adaptation, les preuves en faveur du stockage d'effet consécutif et du gain de contraste poussent les chercheurs à trouver d'autres explications. Par l'intermédiaire du contrôle de gain, quatre mécanismes peuvent expliquer les données : la décorrélation, la correction d'erreur, le recalibrage et le cadre Bayésien.

IV.E Les explications alternatives de l'adaptation

La décorrélation permet surtout d'expliquer l'effet McCollough. La correction d'erreur a de fortes implications. Le recalibrage doit être aménagé pour expliquer les effets consécutifs du groupe I. Le cadre Bayésien n'est pas adapté.

IV.E.1 La décorrélation

L'idée de *décorrélation* comme mécanisme utilisé par les neurones pour optimiser leur codage a été introduite dans les années 90 (Barlow, 1990; Barlow & Foldiak, 1989). Le but est de maintenir au minimum la corrélation qui existe entre différents continums sensoriels. Barlow tente au départ d'expliquer l'*effet McCollough*. Il s'agit d'un effet consécutif négatif particulier car il est spécifique à l'orientation (McCollough, 1965). Après avoir regardé l'image en Figure 34A pendant une durée prolongée, l'image présente en Figure 34B va apparaître comme en Figure 34C.

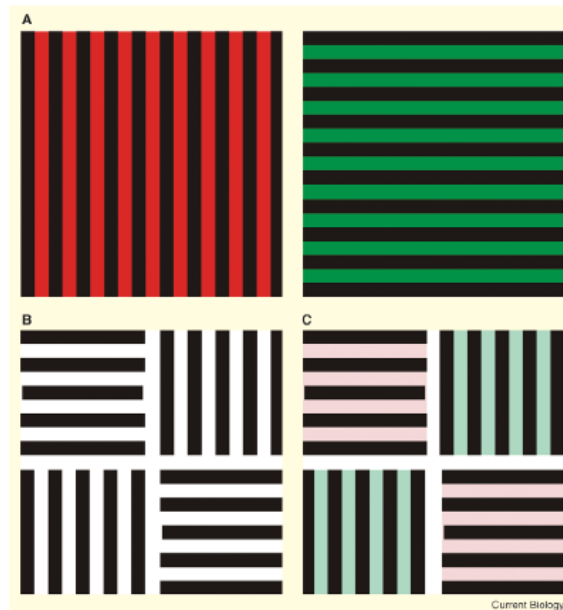


Figure 34 : Effet McCollough. Regardez les deux parties du panneau A pendant 30 sec. Le panneau B doit alors apparaître comme le panneau C. Figure issue de Thompson et Burr (2009).

La contingence entre le rouge et l'orientation verticale crée un effet consécutif opposé, comme si le rouge et l'orientation étaient maintenant codés sur un axe perceptif joint. Cet effet consécutif se stocke très bien sur de longues périodes, plusieurs jours voire des mois (Jones & Holding, 1975). Pour montrer comment la décorrélation peut expliquer l'effet McCollough, prenons deux continuums sensoriels bipolaires (par exemple, l'axe « rouge – vert » et « orientation verticale – horizontale») qui définissent un espace de codage (Figure 35a). Chaque stimulus présenté marque ainsi un point sur l'espace représenté sur le graphique en Figure 35 b. L'adaptation au stimulus McCollough crée de nombreux points corrélés, c'est-à-dire alignés sur le graphique (tout l'espace n'est pas utilisé). La *décorrélation* est une opération qui permet de changer l'orientation des axes du graphique de manière à rendre ces points non-alignés (décorrélés) et ainsi d'utiliser plus d'espace (Figure 35 c et d).

Dans ce nouvel espace, les orientations en noir et blanc apparaissent effectivement colorées. Barlow (1990) propose aussi un mécanisme neuronal, basé sur un principe Hebbien inhibiteur. Un neurone Hebbien augmente sa connectivité avec un autre neurone quand ces neurones sont actifs en même temps. Un *neurone Hebbien inhibiteur* a donc tendance à augmenter son pouvoir inhibiteur de neurones actifs en même temps que lui. Ainsi, lorsque les neurones sensibles au rouge et à l'horizontal déchargent ensemble, leur inhibition réciproque augmente, ce qui les empêche de décharger ensemble à l'avenir et implémente une décorrélation.

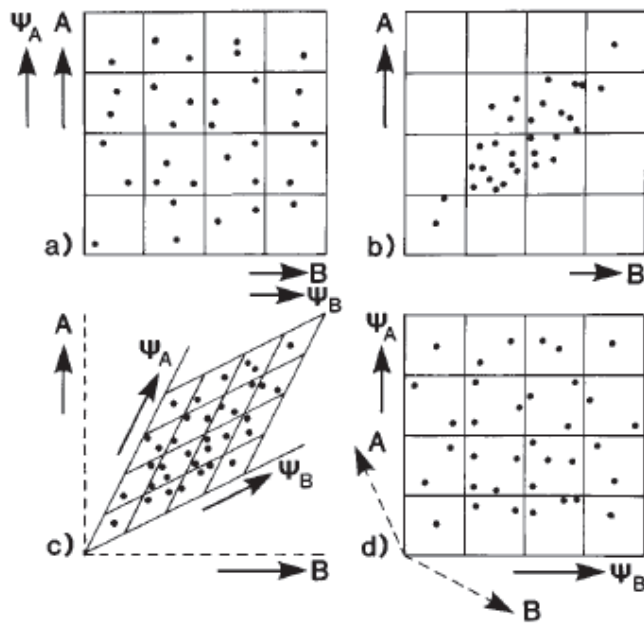


Figure 35 : Illustration de la décorrélation pour deux grandeurs A et B (a). Lorsqu'elles sont corrélées entre elles (b), l'adaptation par décorrélation applique une transformation sur les axes (c) qui maintient les deux grandeurs décorréliées (d). Figure issue de Barlow (1990).

Tandis que la décorrélation permet d'expliquer les effets consécutifs du groupe II, l'effet McCollough, le stockage et le gain de contraste, elle ne peut expliquer les effets consécutifs du groupe I (à cause du paradoxe de distance) et son implémentation pose problème. Ainsi, les neurones préférant un certain stimulus répondent ensemble à ce stimulus : ils ne peuvent que renforcer leur inhibition réciproque. En l'absence de situation amenant cette population à répondre de manière décorréliée (pour diminuer leur inhibition réciproque), la population est, à terme, condamnée au mutisme.

IV.E.2 La correction d'erreur

Le but de la décorrélation était d'optimiser le codage neuronal. La fonction principale de l'adaptation pourrait être de corriger les erreurs constantes qui peuvent avoir lieu par des atteintes du système de perception (Andrews, 1964), sans modification des propriétés statistiques du monde. Par exemple, la détection de l'orientation est basée sur l'activité des canaux préférant différentes orientations. Si une atteinte cérébrale diminuait l'activité d'un de ces canaux, le système visuel serait en permanence biaisé, créant un effet consécutif d'orientation permanent. Le système pourrait simplement corriger ce biais en faisant des hypothèses sur le monde (ce qui est parfois appelé *un critère*) : par exemple, les occurrences des orientations sont équiprobables. Cela signifie que sur un temps suffisamment long, la fréquence de chaque orientation est identique et toute divergence de la distribution équiprobable signale une erreur liée au système nerveux lui-même

plutôt qu'attribuée à un changement du monde. Un processus de surveillance peut donc mesurer cette distribution sur un temps prolongé, et un autre processus peut modifier le gain des neurones pour effectuer des corrections lorsque des erreurs sont détectées. Cette théorie a l'intérêt de bien rendre compte des deux groupes d'effets consécutifs et du stockage. Elle a plus de difficulté pour expliquer l'effet McCollough, mais Anstis (1975) ou Dodwell et Humphrey (1990) ont proposé des explications. Le principal problème semble être cette hypothèse d'équiprobabilité qui a des implications fortes : soit le système visuel produit cette hypothèse après une mesure pendant une période critique (Hubel & Wiesel, 1964; Wiesel & Hubel, 1965), soit il possède l'hypothèse de manière innée, par sélection naturelle (Andrews, 1964).

IV.E.3 Le recalibrage

Les théories de *recalibrage* regroupent plusieurs explications de l'adaptation. Selon Gibson (1937), le recalibrage opéré pendant l'adaptation est une modification du zéro des continuums sensoriels. Ce zéro n'est pas fixe et serait dépendant de l'activité perceptive récente. Plus précisément, il serait modifié en permanence pour correspondre à la moyenne de cette activité sur le continuum. Cette approche est très similaire à la création d'une norme à partir de laquelle les stimuli sont codés (Webster, 2011; Webster, Kaping, Mizokami, & Duhamel, 2004; Webster, Werner, & Field, 2005). La manière de modifier ce zéro pourrait être très proche du mécanisme de correction d'erreur : un processus de surveillance calcule la moyenne sur un temps récent et un autre modifie le gain de manière à se rapprocher de la moyenne. La différence avec la correction d'erreur est donc principalement l'absence d'hypothèse sur l'équiprobabilité : la distribution est mesurée en permanence. Le stockage et les effets consécutifs du groupe II sont bien expliqués par le recalibrage mais ceux du groupe I sont plus difficiles à expliquer car ils sont caractérisés par l'absence de zéro. On peut imaginer que la distribution des réponses récentes des canaux est mesurée et que les gains des canaux sont modifiés individuellement de manière à faire correspondre cette distribution avec une distribution mesurée anciennement. Ainsi, l'adaptation crée un déséquilibre dans la distribution mesurée récemment comparée à la distribution mesurée anciennement. Je développe une telle approche pour expliquer les résultats de l'étude 5 (chapitre 6).

IV.E.4 Le cadre Bayésien

L'adaptation est une relation négative entre le percept courant et les percepts passés. Le cadre Bayésien (cf. I.B.6(b)) ne peut rendre compte de cette relation par la modification des connaissances *a priori*. En effet, quand un percept est intégré sous la forme d'une connaissance *a*

priori, il rend plus probable sa perception future : la relation entre percepts courant et passés est donc positive (Stocker & Simoncelli, 2006b). Certains proposent que la fonction de vraisemblance est modifiée par l'histoire (Clifford et al., 2007; Stocker & Simoncelli, 2006b). Pour cela, la dispersion de la fonction de vraisemblance est diminuée pour la valeur du stimulus adaptant et augmentée autour. Cette modification résulte en une répulsion correspondante aux données psychophysiques. Néanmoins, cette modification est équivalente à une augmentation du rapport signal sur bruit du stimulus adaptant, ce qui semble intuitivement correct mais ne correspond pas aux données. En effet, nous avons vu que les seuils de détection augmentent pour la valeur de l'adaptant au lieu de diminuer. Il est possible que de futurs développements rendent ce modèle plausible mais il n'est pour l'instant pas suffisant pour rendre compte de l'adaptation.

IV.F Adaptation à long terme

Suite à une stimulation très prolongée (en mois), l'adaptation peut avoir un effet très long (en mois) pour la couleur, l'orientation ou les attributs liés aux visages.

Saturation of the tilt after-effect (Greenlee & Magnussen, 1987) occurs only after 1h (with a 1h decay). See also (Magnussen & Kurtenbach, 1980) for more data.

Certaines caractéristiques des visages peuvent être adaptées. Ainsi, après qu'un visage masculin a été présenté pendant trois minutes, un visage androgyne (obtenu par morphing) est perçu comme plus féminin (Webster et al., 2004). Quand un visage asiatique est présenté pendant la même durée, un visage neutre (autant asiatique que caucasien) est ensuite perçu comme plus caucasien. Cela fonctionne aussi avec l'expression des émotions ou l'identité. Pour l'identité, le protocole est le suivant : on varie les caractéristiques faciales pour constituer trois visages (par exemple). On relie les trois visages au visage moyen par trois axes de morphing. Ces axes peuvent être prolongés au-delà du visage moyen, créant des anti-visages. On adapte alors cinq secondes avec l'un de ces anti-visages et on teste avec le visage moyen. Adapter à l'anti-visage « Billy » rend le visage moyen plus identifiable comme « Billy » (Leopold, O'Toole, Vetter, & Blanz, 2001).

A long terme, l'adaptation a lieu par la mise-à-jour d'une norme (Webster, 2011; Webster et al., 2005), d'un prototype (par exemple, le visage moyen). Ainsi, le visage neutre pour un japonais qui vient d'arriver aux Etats-Unis est beaucoup plus asiatique que s'il réside depuis un an aux Etats-Unis (Webster et al., 2004) ou que s'il est américain. En d'autres termes, le visage neutre pour un japonais résidant depuis peu aux Etats-Unis est perçu comme caucasien pour un japonais et comme asiatique pour un américain (effet consécutif négatif à long terme).

La couleur peut aussi être adaptée à long-terme (Belmore & Shevell, 2008; Neitz, Carroll, Yamauchi, Neitz, & Williams, 2002) : après plusieurs jours de port d'un filtre rouge pendant 4 à 8h

par jour, une adaptation négative apparaît (le jaune est perçu comme plus vert qu'avant l'exposition) et dure de plusieurs jours à plusieurs semaines après la fin de l'exposition.

Finalement, les orientations peuvent aussi être adaptées à long terme (Zhang, Bao, Kwon, He, & Engel, 2009). Quand une personne n'est pas exposée pendant plusieurs heures à une orientation (à travers un filtre en direct dans un monde de réalité virtuelle), elle devient plus sensible à cette orientation. Pour ces grandeurs donc (couleur, orientation, genre, expression et ethnicité des visages), on observe un effet d'adaptation à long-terme plutôt qu'un effet de mémoire.

Nous avons vu en détail les données générales et les théories de l'adaptation. Nous allons maintenant voir comment l'adaptation peut nous renseigner sur les mécanismes de la bistabilité.

IV.G Transfert d'adaptation et adaptation sous suppression

La bistabilité permet de mieux comprendre l'adaptation. En retour, les données sur l'adaptation permettent de mieux comprendre la structure des réseaux bistables. Par exemple, les données sur le transfert interoculaire indiquent que le site d'adaptation est à la fois monoculaire et binoculaire pour l'orientation et le mouvement, et binoculaire pour la couleur. La suppression affecte l'adaptation, ce qui est compatible avec un site de suppression placé au même niveau que le site d'adaptation (et donc binoculaire pour le mouvement et les orientations). Certaines données vont à l'encontre de la théorie de l'adaptation comme cause des renversements mais le débat reste ouvert.

IV.G.1 Transfert interoculaire

Lorsqu'un œil est adapté et que le test est présenté dans l'autre œil, est-ce que l'effet d'adaptation se transfère ? Un transfert interoculaire complet de l'effet consécutif de couleur (sous certaines conditions, Favreau & Cavanagh, 1983) est observé. Cela signifie que le siège de l'adaptation à la couleur est binoculaire. Un transfert complet de l'effet consécutif d'orientation fut d'abord trouvé (Campbell & Maffei, 1971; Gibson & Radner, 1937a) mais des travaux plus récents ne confirment qu'un transfert partiel, de 50 à 70% (Adams & Mamassian, 2002; Blake, Overton, & Lema-Stern, 1981; Mitchell & Ware, 1974; Movshon, Chambers, & Blakemore, 1972). Cela indique que l'adaptation est à la fois monoculaire et binoculaire. De même, l'effet consécutif de mouvement ne se transfère que partiellement (O'Shea & Crassini, 1981)⁴⁶. L'effet McCollough par

⁴⁶ A l'exception de l'effet consécutif de mouvement obtenu avec des points aléatoires, qui se transfère complètement (McColl & Mitchell, 1998).

contre, ne se transfère pas du tout (McCollough, 1965) tandis que le même effet avec des images imaginées se transfère complètement (Kaufman, May, & Kunen, 1981).

IV.G.2 Adaptation sous suppression

Un stimulus peut-il être adapté bien que supprimé pendant la rivalité binoculaire? A première vue, c'est le cas puisque des effets consécutifs presque complets de fréquence spatiale (Blake & Fox, 1974), d'orientation (Wade & Wenderoth, 1978), de mouvement (Lehmkuhle & Fox, 1975; O'Shea & Crassini, 1981)⁴⁷ et une élévation consécutive des seuils (Blake & Fox, 1974; Blake & Overton, 1979) sont observés même lorsque que le stimulus adaptant est supprimé. Cela signifie que le site de suppression est situé au-delà du site d'adaptation. Néanmoins, une expérience récente trouve une diminution de l'élévation consécutive des seuils à l'orientation et une diminution de l'effet consécutif de mouvement (Blake, Tadin, Sobel, Raissian, & Chong, 2006). Ces diminutions sont de plus corrélées avec la durée de suppression du stimulus adaptant. L'idée de cette étude est que la diminution de l'effet consécutif n'était pas visible car de fort contraste étaient utilisés, ce qui sature l'effet. Cette diminution apparaît avec de plus faibles contrastes. Une autre expérience ne trouve qu'un effet consécutif de mouvement partiel (Van Der Zwan, Wenderoth, & Alais, 1993). Pour les unités de mouvement, j'en conclus que la suppression a lieu au niveau binoculaire, juste après les sites d'adaptation monoculaire, de même que pour les orientations. De même, les images consécutives d'orientation sont diminuées lorsqu'induite pendant la rivalité binoculaire (Gilroy & Blake, 2005), ce qui indique que cette forme d'adaptation a aussi lieu au même niveau ou après la suppression. La moitié de l'image consécutive de couleur survit une suppression flash continue au mouvement (Tsuchiya & Koch, 2005), ce qui veut dire que ce type d'image consécutive a lieu en partie après le site de suppression de la rivalité de mouvement. Par contre, les expressions faciales, le genre et l'identité des visages ne sont pas adaptés pendant la suppression flash continue (Moradi, Koch, & Shimojo, 2005; Yang, Hong, et al., 2010). Le site d'adaptation des visages est donc placé après le site de suppression du mouvement. Finalement, nous avons vu que l'effet consécutif de mouvement est stocké lorsqu'un temps sépare les stimuli adaptant et test. Cet effet continue d'être stocké (Wiesenfelder & Blake, 1992) même quand le stimulus test présenté dans l'œil adapté est rendu invisible par suppression avec une grille de fort contraste.

⁴⁷ Consulter aussi les travaux de Maruya, Watanabe et Watanabe (2008) et Blake et al. (2006) pour le cas complexe du transfert interoculaire de l'effet consécutif dynamique et de sa suppression.

IV.G.3 Adaptation comme cause des renversements

L'adaptation peut créer les renversements dans un système à deux unités en compétition, dont l'une est supprimée. La durée de la phase de l'unité libérée de la suppression devrait être inversement corrélée avec sa durée de suppression (autrement dit avec la durée de la phase précédente) et nous avons vu que ce n'était pas le cas (section I.A). Un autre élément en contradiction avec la théorie des renversements par adaptation, est que la sensibilité de détection d'une cible dans l'œil supprimé ne varie pas avec la durée depuis le dernier renversement, et donc avec le niveau supposé d'adaptation (Fox & Check, 1972). Une étude récente trouve cependant l'inverse (Alais, Cass, O'Shea, & Blake, 2010). Taylor et Aldridge (1974) observent que le taux de renversement est constant⁴⁸ avec le temps depuis le dernier renversement, ce qui va aussi à l'encontre de la théorie du renversement par adaptation (qui prévoit une augmentation). Des articles récents (Kang & Blake, 2010) viennent soutenir la théorie de l'adaptation comme cause des renversements. Notamment, lorsque le stimulus bistable (sphère en rotation ou rivalité d'orientation) se déplace continuellement sur une orbite, le taux de renversement diminue, ce qui est prédit si l'adaptation locale est la cause du renversement (Blake, Sobel, & Gilroy, 2003).

IV.H Mémoire et hystérésis dans la bistabilité

Une mémoire à court terme pour les stimuli bistables s'exprime au travers de dépendances entre percepts, d'un effet d'hystérésis, de la stabilisation en présentation intermittente ou de préférences idiosyncrasiques stables.

IV.H.1 Dépendances entre percepts

Bien que le moment des renversements est aléatoire (cf. I.B.3), le choix des percepts ne l'est pas. Ainsi, une expérience (Suzuki & Grabowecky, 2002) a étudié un stimulus multistable, c'est-à-dire qui est perçu de plus de deux façons alternativement dans le temps. Les auteurs trouvent qu'il existe des dépendances dans les transitions : les percepts restent piégés entre deux configurations qui s'opposent par exemple par leur forme. En Figure 36, les alternances seront plus fréquentes entre le sablier et le losange, ou entre les chevrons, quel que soit les stimuli présentés aux yeux (A ou B).

⁴⁸ voire même diminue légèrement

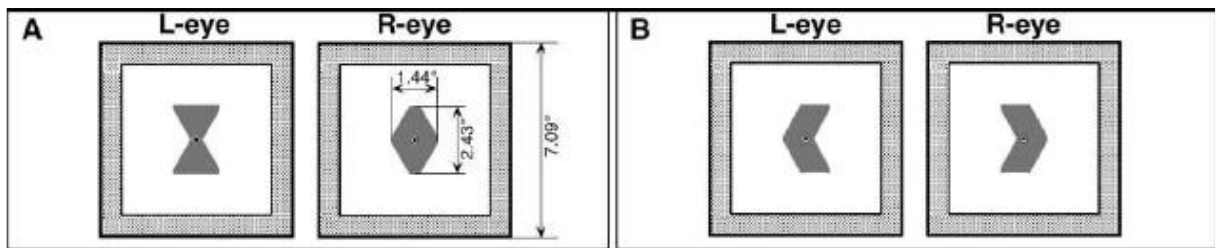


Figure 36 : Stimuli multistables. Chaque stimulus (A ou B) peut alterner entre toutes les figures en A et B, par groupement interoculaire (sablier, losange, chevrons droite et gauche). Figure issue de Suzuki et Grabowecky (2002).

IV.H.2 Hystérésis

Une hystérésis est une tendance à favoriser la réponse actuelle. Ce phénomène est observé dans les escaliers psychométriques non-multiples ou la méthode des ajustements. Un percept dépend largement de la stimulation physique : quand cette stimulation est changée progressivement sur une dimension, le percept change lui aussi, mais moins vite. Une même stimulation peut donc être vue d'une certaine manière quand elle est précédée de stimulations supérieures sur cette dimension ou d'une autre manière quand les stimulations sont inférieures. Des effets d'hystérésis ont été observés en rivalité (Buckthought et al., 2008) et avec les figures ambiguës : le groupement de points (Gepshtein & Kubovy, 2005), le quadruplet de points (Hock, Kelso, & Schoner, 1993) ou le stimulus du diamant (Lorenceanu, Gimenez-Sastre, & Lalanne, 2003).

IV.H.3 Stabilisation en présentation intermittente

Lorsqu'un stimulus ambigu est présenté de manière intermittente, avec des blancs d'une certaine durée, la perception peut rester bloquée sur la même interprétation pendant de longues périodes (Leopold et al., 2002; Orbach, Ehrlich, & Heath, 1963; Pearson & Brascamp, 2008), un phénomène appelé *stabilisation*. Cette stabilisation est une mémoire rétinotopique, qui ne comprend pas de caractéristiques non-pertinentes (pour la rivalité) telles que la couleur du stimulus, sa taille, sa profondeur⁴⁹ et peut être basée sur l'œil en rivalité d'orientation (Chen & He, 2004) ou sur l'orientation, en rivalité permutée (Pearson & Clifford, 2004). On a d'abord pensé que la mémoire ne prenait en compte qu'un seul percept : en effet, quand le stimulus est interrompu dans les deux secondes après un renversement (blanc court), le percept d'avant le renversement

⁴⁹ Etrangement, l'axe de rotation (orientation du stimulus) dans la sphère en mouvement est stocké dans cette mémoire, de sorte que des stabilisations indépendantes ont lieu pour chaque axe (Maier, Wilke, Logothetis, & Leopold, 2003).

est perçu à la réapparition du stimulus (Brascamp et al., 2008; Leopold et al., 2002). Mais il a été trouvé (1) que plus le percept avant le renversement est long, plus la stabilisation échoue (Brascamp et al., 2008) et (2) qu'un percept stabilisé pendant 8 blancs (Brascamp et al., 2008) impose son influence sur les 4 prochains renversements (jusqu'à 1 minute).

Des modèles d'adaptation ont aussi essayé de rendre compte de la stabilisation (Wilson, 2007). La cause de la stabilisation pourrait être que l'adaptation de l'unité dominante n'a pas le temps d'atteindre un niveau critique (parce qu'elle se dissipe pendant le blanc) : là encore, le renversement obtenu avec des blancs courts vient à l'encontre de cette hypothèse. Un dernier phénomène important est que la stabilisation est périodique : elle dure un nombre déterminé (et stable) de présentations intermittentes (Brascamp et al., 2009). Cette observation amène à un modèle (Figure 37) qui rend compte des propriétés de la stabilisation mais aussi de la facilitation-suppression flash (Brascamp et al., 2009). De manière simplifiée, le modèle prévoit une trace accumulée plus vite pendant la perception qu'elle n'est dissipée en dehors. Cette trace détermine le percept au moment de la présentation. Lorsqu'elle est sous un certain seuil, elle correspond à une mémoire et crée une facilitation-stabilisation. Au-dessus du seuil, elle correspond à une adaptation et crée une suppression-renversement. Le modèle est par contre difficilement applicable à la présentation continue.

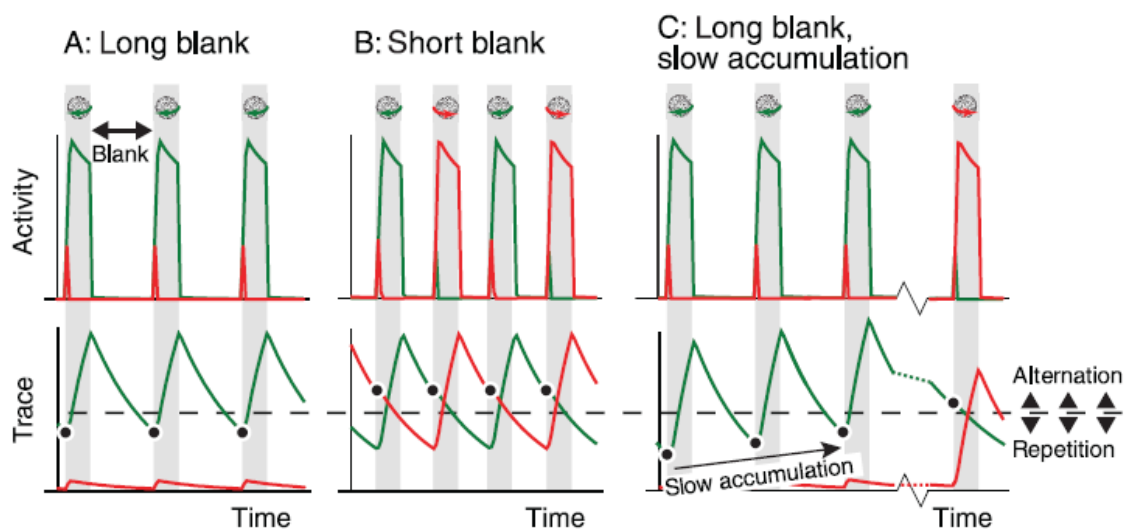


Figure 37 : Illustration du modèle expliquant la stabilisation pour les blancs longs (A), la déstabilisation pour les blancs courts (B) ainsi que la stabilisation pendant un nombre stable de présentations (C). Figure issue de Brascamp et al. (2008).

IV.H.4 Préférences stables

Il existe une forte idiosyncrasie sur certaines dimensions bistables. Par exemple, en rivalité de transparence de mouvement, la surface perçue devant dépend fortement de l'orientation du

stimulus (Mamassian & Wallace, 2010). L'orientation la plus bistable est différente pour chacun et pourtant fixe dans le temps. Ces préférences pourraient provenir de l'attribution d'un paramètre interne libre à une sorte de valeur par défaut (Gepshtein & Kubovy, 2005). De même en rivalité binoculaire en présentation intermittente, une orientation domine sur l'autre en fonction de la position rétinienne de manière stable et idiosyncrasique (Carter & Cavanagh, 2007). Pourtant, cette dernière étude ne retrouve pas ces biais idiosyncrasiques lorsque la présentation est continue. Elle tente d'expliquer la stabilisation en présentation intermittente comme résultant de ce biais idiosyncrasique qui serait spécifique à l'apparition du stimulus et à une position rétinotopique. Presque rien de plus n'est connu sur ces biais : pourquoi existent-ils ? Sous quelles conditions peuvent-ils être changés ? Correspondent-ils à une valeur par défaut déterminée arbitrairement pendant une période critique ou ont-ils une fonction qui justifie leur valeur ?

Introduction à quelques problèmes généraux

Dans cette partie, j'introduis quelques situations spécifiques, en dehors du cadre du laboratoire, afin de motiver d'une autre manière certaines études effectuées en partie expérimentale.

IV.I L'artilleur

Imaginons que vous soyez artilleur. Vous avez en visuel deux cibles à atteindre, côte à côte. Elles ont la même taille rétinienne et position par rapport à l'horizon. Pour les atteindre, vous devez estimer la distance entre vous et ces cibles. Comme nous l'avons vu en introduction générale, il existe une infinité de couples distance / taille de la cible compatibles avec cette taille rétinienne. Ayant fréquemment vu des cibles, vous avez une idée de leur taille (connaissance *a priori*). Votre système visuel vous impose donc de voir ces deux cibles de même taille à la même distance. Vous manœuvrez l'artillerie avec précision pour atteindre chacune des cibles. Pour la première cible, l'obus explose bien trop loin et pour la deuxième, il explose bien trop près. Il s'agit en fait d'une blague de votre sergent instructeur, qui a fait placer une toute petite cible très près ainsi qu'une immense cible très loin dans le but de vous donner une leçon. Vous êtes capable d'interpréter consciemment ces erreurs de tir et de modifier le réglage de l'artillerie en conséquence. Une question intéressante est de savoir si votre système visuel peut faire de même implicitement. Ainsi, lorsque vous regardez les cibles à nouveau, les voyez-vous maintenant avec une taille et une distance différentes ? Le signal d'erreur a-t-il été répercuté aussi loin que le niveau visuel ? D'après les modèles actuels pourtant, cela ne devrait pas changer votre perception. Une récompense interne (ou l'inverse) ne semble pas capable de modifier un *a priori* ou une fonction de vraisemblance : autrement dit, un percept plus utile pour une tâche ne change pas pour autant sa probabilité étant

donné son image sur la rétine. Je développe cette question en perception bistable dans les études 1 et 2, dans lesquelles j'étudie comment une interprétation bistable plus utile pour une tâche peut être perçue au détriment d'une autre, pourtant tout aussi probable. La tâche n'est pas aussi complexe qu'une manœuvre d'artillerie mais elle est visuelle : il s'agit de rechercher une cible.

IV.J Roulette de casino et image consécutive martienne

Dans un casino, imaginons que vous portiez votre dévolu sur le jeu de la roulette. Rapidement, vous remarquez que le chiffre 1 n'est pas sorti depuis votre arrivée. Tous les autres chiffres étant sortis, vous décidez de concentrer vos paris sur le 1. Cette intuition pourtant courante, n'est pas correcte car tous les tirages étant indépendants des précédents, le chiffre 1 est tout aussi probable au prochain tirage que n'importe quel autre chiffre. Cette erreur s'appelle *le paradoxe du joueur* et est bien connue dans le domaine du raisonnement. Le paradoxe est invariablement retrouvé à la roulette (Croson & Sundali, 2005; Keren & Lewis, 1994; Sundali & Croson, 2006), aux loteries (Clotfelter & Cook, 1993), dans les paris sportifs (Alter & Oppenheimer, 2006) ou les courses hippiques (Terrell, 1994). Il connaît deux formes :

(1) Le joueur pense que s'il n'a pas gagné depuis longtemps, ses chances de gagner sont plus fortes (il augmente donc le montant de ses paris). Cette forme s'oppose à la *chance* qui est la croyance que si l'on gagne plusieurs fois de suite, on va continuer de gagner (les montants joués augmentent aussi).

(2) Le joueur pense de manière plus générale, que lorsqu'un évènement se produit moins souvent qu'il ne l'a fait jusqu'alors, ses chances d'arriver augmentent. Cette forme implique donc de comparer la probabilité récente d'un évènement avec sa probabilité idéale ou mesurée dans le passé. Il s'agit d'un biais de représentativité (Kahneman & Tversky, 1972; Tversky & Kahneman, 1974) : les caractéristiques d'une séquence d'évènements doivent correspondre à la distribution moyenne de la population dont la séquence est issue.

L'une des questions de cette thèse est de déterminer si le système visuel commet la même erreur que le joueur ou est immune à celle-ci (étude 5). Comment cela se traduirait-il ?

Imaginons qu'un spationaute débarque sur Mars. Sa mission se résume à une demi-journée d'exploration dans un environnement inlassablement rouge. Au bout de quelques minutes, son système visuel devrait souffrir d'un effet consécutif de couleur. Cet effet ne devrait pas être très différent après plusieurs heures, le plafond étant atteint. Ainsi, tout objet blanc devrait apparaître vert et le collègue spationaute qui l'accompagne, dans sa combinaison blanche, devrait ressembler à un petit homme vert. Pourtant il serait intéressant pour le système visuel de pouvoir finalement

percevoir le spationaute blanc comme blanc malgré le changement d'environnement : l'adaptation devient ici un inconvénient (Kohn, 2007; Webster, 2011) en faussant la perception. Cependant, si le système commettait le paradoxe du joueur, l'effet consécutif devrait disparaître. Imaginons ce qu'il se passerait dans ce cas. Quelques minutes après le débarquement du spationaute, son système visuel considèrerait que le rouge sort plus fréquemment qu'habituellement et il prédirait du vert (effet consécutif). Après plusieurs heures d'exploration, le système visuel considèrerait qu'il y a autant de rouge dans l'environnement récent que dans l'environnement de référence, par exemple celui mesuré il y a une heure. Dans ce cas, il n'aurait pas de raison de prédire le prochain évènement visuel comme vert plutôt que rouge. Et le blanc apparaît blanc.

Nous examinons un modèle similaire de la perception des orientations en rivalité binoculaire (adaptation prédictive) pour expliquer les données collectées au cours de l'étude 5.

CHAPITRE 3 : PARTIE EXPERIMENTALE - INFLUENCE DE L'UTILITE D'UN PERCEPT SUR LA BISTABILITE

I. Introduction

Nous avons étudié différents travaux en introduction qui montrent (1) qu'il est possible de modifier l'apparence d'un stimulus bistable grâce à un recrutement d'indice (section **Error! Reference source not found.**) ; (2) que la tâche peut modifier l'apparence d'un stimulus ambigu (section III.F.3) ; (3) que l'utilité dans la tâche⁵⁰ influence le déploiement de l'attention ou l'amorçage du pop-out (section III.F.4). Est-il possible de modifier l'apparence d'un stimulus bistable par une influence directe de l'utilité de la tâche ?

Les deux études suivantes (études 1 et 2) ont pour but de mettre en évidence un tel effet sur l'apparence des stimuli bistables. La première étude se concentre sur la rivalité binoculaire et la seconde étend les résultats à la rivalité de transparence de mouvement. Le cœur du paradigme consiste à demander aux sujets d'effectuer une tâche auxiliaire (recherche de cible) sur les stimuli bistables. Cette tâche auxiliaire définit une interprétation utile et une interprétation moins utile pour cette recherche. Pendant certains essais, il n'y a pas de tâche auxiliaire mais seulement une tâche de mesure de la bistabilité. Le but est de déterminer si l'interprétation utile domine pendant la recherche, puis continue de dominer de manière à être mesurée pendant la mesure de la bistabilité. Le paradigme est fait de telle manière que les observateurs ne sont pas conscients de l'utilité des interprétations. Si l'apprentissage a lieu, il est donc implicite.

En introduction, nous avons aussi posé la question du rôle des préférences stables et idiosyncrasiques trouvées en rivalité de transparence de mouvement (section IV.H.4). La deuxième étude répond aussi à cette question en tentant de modifier ces préférences par l'utilité dans la tâche.

⁵⁰ Nous avons défini un stimulus ou un percept comme *utile* pour une tâche quand il permet d'augmenter les performances à cette tâche.

II. Étude 1 : L'utilité de la tâche influence l'apparence d'orientations en rivalité binoculaire

II.A Article: Chopin, A., & Mamassian, P. (2010). Task usefulness affects perception of rivalrous images. *Psychological Science*, 21(12): 1886-93.

III. Étude 2 : L'utilité de la tâche influence l'apparence de la transparence de mouvement

III.A Article: Chopin, A., & Mamassian, P. (2011). Usefulness Influences Visual Appearance in Motion Transparency Depth Rivalry. *Journal of Vision*, 11(7). doi:10.1167/11.7.18.

IV. Discussion

En résumé, la première étude montre qu'en rivalité d'orientation, l'utilité plus forte d'une interprétation pour une tâche de recherche visuelle affecte le premier percept bistable en le biaisant vers cette interprétation. Cette apprentissage est durable, implicite, non-attentionnel, différent de l'amorçage du pop-out et survit même quand l'apprentissage n'est plus pertinent. La deuxième étude confirme l'influence de l'utilité en rivalité de transparence de mouvement : l'apprentissage exhibe les mêmes caractéristiques, avec un délai supplémentaire dans son apparition. De plus, cette dernière étude apporte des données supplémentaires, en montrant que les biais idiosyncrasiques durables évoqués en introduction ne sont pas fixes et arbitraires comme ils le paraissent, mais sont appris, modifiables et influencés par leur utilité dans la tâche en cours.

Je complète la première expérience avec une donnée supplémentaire confirmant le caractère implicite de l'apprentissage et qui a été omis dans l'article. L'expérience était suivie d'un débriefing dans lequel l'observateur était interrogé sur sa conscience des associations existantes pendant l'expérience. Un seul observateur a rapporté avoir remarqué une association entre cible et orientation. Nous leur avons aussi demandé de deviner le sens de l'association et dans ce cas, 3 observateurs sur 9 ont répondu correctement, ce qui n'est pas différent du hasard (l'observateur supposé avoir remarqué n'a pas deviné correctement).

IV.A Relation avec le cadre Bayésien

Nous avons vu en introduction (section I.B.6(b)) que le cadre Bayésien est utile lorsqu'il s'agit d'expliquer le premier percept bistable. Or, nous trouvons un effet de l'utilité uniquement sur le premier percept. Il est donc possible d'essayer de comprendre nos résultats dans le cadre Bayésien : voici quelques idées dans cette direction. En rivalité binoculaire, le système visuel est confronté à deux images très différentes dans chaque œil et son but est d'estimer l'objet dans le monde qui a généré ces deux images (Hohwy et al., 2008). Le calibrage du rapport de contraste interoculaire que nous avons effectué pour chaque observateur, assure que la probabilité *a posteriori* de chaque interprétation est la même (cf. Boîte 1, section I.B.6(b), pour une rapide introduction au cadre Bayésien). Cette implication découle de la règle de correspondance des probabilités: une interprétation est perçue avec la même probabilité que sa probabilité *a posteriori*. La probabilité *a posteriori* peut ensuite être combinée avec une fonction de gain. Cette fonction de gain détermine les gains ou les pertes en fonction de la distance entre le percept et la réalité. Le système peut alors calculer *l'utilité attendue* de chaque percept (Kersten, Mamassian, & Yuille, 2004; Mamassian, Landy, & Maloney, 2002; Trommershäuser, Maloney, & Landy, 2003). Commençons par l'utilité attendue de l'orientation A. Pour chaque orientation possible, on peut

calculer un gain associé si cette orientation est dans le monde alors que l'orientation A est perçue. L'utilité attendue est la convolution de ce gain par la probabilité *a posteriori* que cette orientation soit dans le monde. Le système aura tout intérêt à se décider en faveur du percept qui a la plus forte utilité attendue associée (équivalent du MAP). Il peut aussi utiliser une règle de correspondance des probabilités appliquée aux gains, comme il est courant en cognition animale (Baum, 1979; Greggers & Mauelshagen, 1997; Greggers & Menzel, 1993; Herrnstein, 1961) : plus grande est la probabilité qu'un percept apporte un gain, plus il est perçu⁵¹. J'ai fait deux remarques en introduction à propos de la règle de correspondance des probabilités (sections I.C.3 et I.B.6(b)) : (1) celle-ci est optimale lorsqu'elle est appliquée dans un monde changeant ; (2) le monde visuel n'est pas changeant, dans le sens qu'une même image est souvent provoquée par la même cause. Je pense donc que la règle n'est pas appliquée pour la distribution *a posteriori* mais uniquement pour l'étape ultérieure, lorsque la fonction de gain est appliquée. Le monde des récompenses est bien changeant parce que dépendant fondamentalement de la tâche en cours et la règle de correspondance des probabilités (de gain) est donc plus proche de l'optimalité.

D'abord estimée, la fonction de gain peut ensuite être modifiée essai par essai, en mesurant la perte réelle. En pratique, lorsque le système visuel se décide en faveur d'un percept, les conséquences d'une erreur ne peuvent être déterminées que par les fonctions cognitives qui utilisent ce percept et ces fonctions sont dépendantes de la tâche en cours. Dans nos expériences, c'est la tâche de recherche visuelle qui détermine le percept associé avec un gain⁵². Pour cela, toute la fonction de gain est modifiée car le système visuel ne peut accéder directement à l'erreur commise. Le gain est donc certainement réparti entre les stimuli les plus probables *a posteriori*.

Cependant, nos données sont limitées. Bien que tentante, une explication impliquant la fonction de gain ne serait pas différenciable d'une autre modification des étapes Bayésiennes (distribution *a priori* ou fonction de vraisemblance) et la modification de la fonction de gain reste donc une suggestion.

⁵¹ Il suffit alors de normaliser les utilités attendues de telle manière que leur somme vaille un pour obtenir des probabilités.

⁵² Le gain peut aussi être fonction de la performance, du temps de réaction par exemple, comme dans notre étude 2.

IV.B Relation avec le conditionnement probabiliste

Nous avons vu en introduction qu'il était possible de conditionner l'apparence bistable de manière Pavlovienne (section **Error! Reference source not found.**) en recrutant une variable auxiliaire ou d'opérer un conditionnement opérant des performances perceptives (section **Error! Reference source not found.**). Dans ce dernier cas, une récompense interne est responsable de l'augmentation des performances. Nous montrons dans les deux présentes études, que la récompense interne issue d'une recherche de cible peut être mise à profit pour le système bistable et déterminer l'apparence du stimulus. Ces données peuvent donc être interprétées comme un conditionnement opérant de l'apparence visuelle, au sens strict⁵³. L'action (opérante) correspond ici à la décision perceptive du système visuel et la récompense correspond à l'utilité (au gain mesuré suite à la décision) dans la tâche de recherche visuelle. Cette théorie est compatible avec un mécanisme probabiliste : nous avons vu en introduction (section **Error! Reference source not found.**) que le conditionnement n'est pas qu'une simple transmission d'une réponse à un stimulus mais qu'il repose sur le caractère informatif et prédictif de ce stimulus vis-à-vis de la réponse.

Malheureusement, nous ne sommes pas en mesure de faire la différence entre l'utilisation d'une fonction de gain ou l'apparition d'un conditionnement opérant probabiliste. Les données des deux études sont compatibles avec les deux explications. Le caractère durable de nos résultats correspond peut-être plus à ce qui est observé dans les études de conditionnement probabiliste.

⁵³ c'est-à-dire probabiliste et qui n'est pas uniquement un conditionnement opérant des performances

CHAPITRE 4 : SPECIFICITE DES PREMIERS PERCEPTS

ETUDE 3

Nous avons détaillé en introduction les éléments en faveur d'une spécificité des traitements en jeu pendant le premier percept (section I.B.6), principalement en rivalité binoculaire. Dans les deux études précédentes, un effet de l'utilité a été trouvé sur le premier percept des épisodes bistables et, au moins pour la première étude, cet effet était spécifique au premier percept. Dans cette étude 3, deux nouvelles questions sont abordées :

- (1) La spécificité du ou des premiers percepts se généralise-t-elle à d'autres stimuli bistables et à d'autres conditions, notamment en situation de contrôle volontaire ?
- (2) Existe-t-il une spécificité du premier percept ou *des* premiers percepts en rivalité binoculaire?

V. Partie I : Réanalyse exploratoire des données de van Ee et al. (2005)

V.A Introduction

Est-ce que la spécificité du ou des premiers percepts se retrouve pour d'autres stimuli et dans d'autres conditions ? La littérature a par exemple suggéré de manière implicite que l'effet de l'attention ne se produisait que sur le début d'un épisode bistable (Chong & Blake, 2006; Kamphuisen et al., 2007). En fait, ces expériences n'ont simplement pas mesuré au-delà mais d'autres auteurs (Mitchell et al., 2004; Ooi & He, 1999) n'ont effectivement pas trouvé d'effet au-delà de 2 secondes. Nous examinons la spécificité du ou des premiers percepts en réanalysant des données sur le contrôle volontaire de 4 stimuli bistables, collectées dans le laboratoire de Raymond Van Ee (et publiées dans van Ee et al., 2005).

V.B Résumé de la méthode

Quatre stimuli ont été présentés dans 4 conditions. Dans toutes les conditions, la tâche était de rapporter le percept à l'aide du clavier. La première condition consistait simplement en cela. La seconde condition ajoutait une consigne : les sujets devaient volontairement augmenter le nombre de renversements (*accélération*). En troisième condition, il leur fallait faire dominer l'un des percepts et en quatrième condition, il leur fallait faire dominer l'autre percept.

Le premier stimulus était la rivalité d'orientation (Gabors orientés à $+45^\circ$ et -45° par rapport à la verticale). Le deuxième stimulus était la rivalité visage-maison. Le troisième était la rivalité d'inclinaison. Le quatrième correspondait au cube de Necker (présenté avec des lunettes anaglyphes mais à zéro disparité). Six observateurs ont passé l'expérience en rapportant leur percept dans 9 épisodes bistables d'une minute pour chaque sous-condition. Entre deux essais, un essai truqué était inséré (sans réelle rivalité, à l'insu de l'observateur) pour vérifier la fiabilité des observateurs dans la tâche perceptive, malgré les consignes.

V.C Résultats : Préférence transitoire

Les données de cette expérience ont été réanalysées en utilisant une manière plus fine d'étudier la dynamique bistable (Mamassian & Goutcher, 2005) permettant de mesurer l'évolution de celle-ci dans le temps. La préférence transitoire a donc été calculée pour chacun des stimuli (Figure 38). La *préférence transitoire* correspond à la probabilité instantanée de percevoir le stimulus de fort contraste à un temps t des épisodes bistables (elle est moyennée sur tous les épisodes). La préférence transitoire commence de manière très biaisée, en favorisant l'un des percepts (phase initiale), puis croît ou décroît jusqu'à atteindre un plateau (phase stationnaire).

La condition où l'observateur doit volontairement déclencher des renversements ne diffère pas de la condition neutre dans la valeur asymptotique de son régime stationnaire (courbes rouges et noires). Ce résultat ne diffère pas de celui rapporté par van Ee et al., les renversements augmentent par ailleurs par rapport à la condition neutre. Par contre, des différences apparaissent au début des épisodes bistables pour la rivalité visage-maison et la rivalité d'inclinaison : la condition « accélération » atteint le régime stationnaire plus vite. Les conditions où l'observateur doit maintenir l'un ou l'autre des percepts sont différentes de la condition neutre en régime stationnaire. De plus, cet effet est plus fort au début de l'épisode bistable pendant le régime initial, mais seulement pour le percept qui n'est en moyenne pas favorisé au départ. Ce percept non favorisé au départ est ici toujours présenté en abscisse : l'orientation gauche en rivalité, le visage en rivalité visage-maison, la vue du dessous pour le cube de Necker ou la perspective pour la rivalité d'inclinaison.

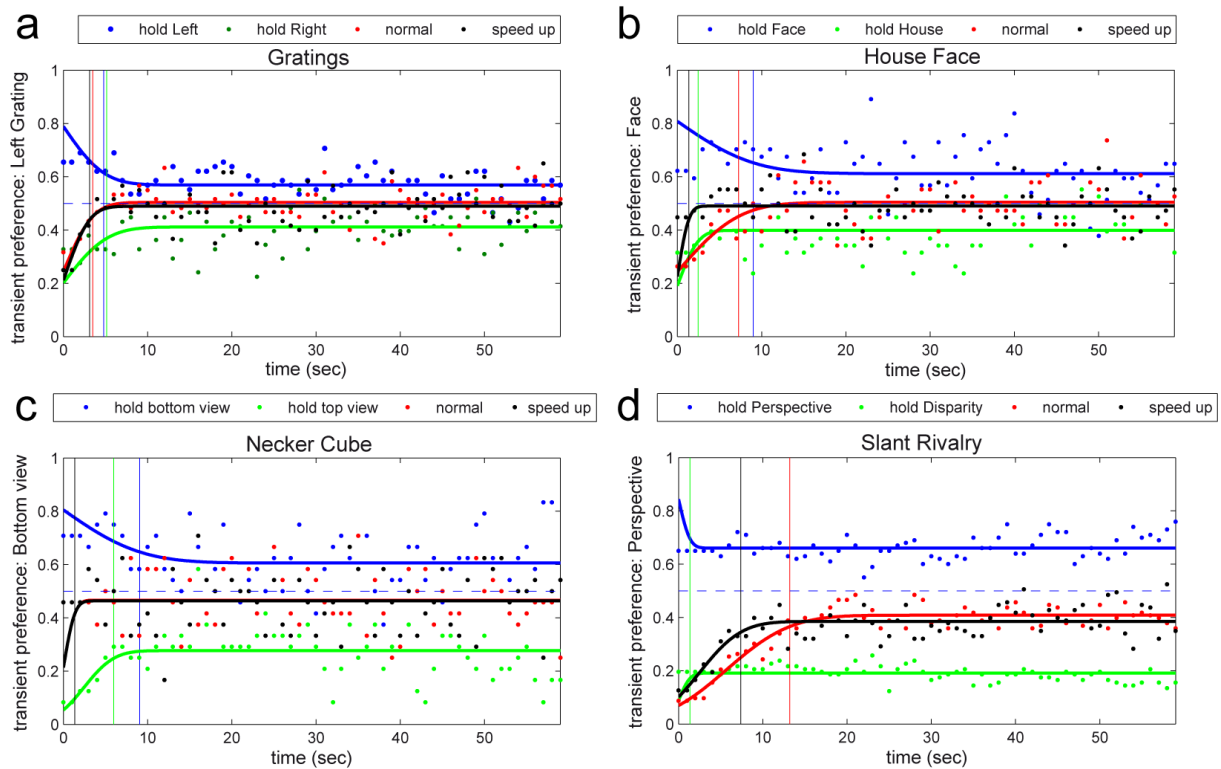


Figure 38 : Préférence transitoire du (a) Gabor orienté vers la gauche (rivalité d'orientation) ; (b) du visage (rivalité visage-maison) ; (c) de la vue du dessous (cube de Necker) ; (d) du percept cohérent avec la perspective (dans la rivalité d'inclinaison). L'axe temporel correspond au temps d'un épisode bistable. Les données sont moyennées sur tous les épisodes et tous les observateurs. Points rouges : condition normale ; points noirs : condition d'augmentation volontaire du rythme des renversements ; points bleus : condition de maintien volontaire du percept en abscisse ; points verts : maintien de l'autre percept. Les points sont bien ajustés par des courbes exponentielles (lignes colorées). Le moment du passage d'un régime biaisé initial à un régime stationnaire est indiqué par la ligne verticale de même couleur (point d'intersection de la tangente de la courbe en régime stationnaire et de la tangente en régime initial).

VI. Partie II : Expérience

VI.A Introduction

Déterminer si le premier percept est vraiment différent des autres percepts est une question importante car de plus en plus d'études sur la rivalité binoculaire ne mesurent que le premier percept. Certains chercheurs ont avancé l'hypothèse que ce premier percept n'impliquait pas les mêmes mécanismes que les autres percepts. Nous étudions cette question dans une expérience de mesure de la dynamique de la rivalité binoculaire en situation non-équilibrée : l'image d'un œil présente un contraste beaucoup plus fort que l'image de l'autre œil, ce qui

maximise les différences sur le premier percept. En rivalité de mouvement, aucune différence n'avait été trouvée (Rubin & Hupé, 2005).

VI.B Méthode

VI.B.1 Observateurs

Nous avons recruté 18 étudiants en master ou doctorant, entre 22 et 30 ans. Leur vision était correcte ou corrigée. Deux observateurs de plus ont été écartés car ils n'ont pas réussi un test de vision stéréoscopique créé pour l'occasion et analogue au *Butterfly Stereopsis Test*, ce qui correspond à une prévalence normale (Richards, 1970).

VI.B.2 Stimuli

Les stimuli étaient des patches de Gabor. La rivalité était produite en orientant le Gabor d'un œil à 45° à droite de la verticale (orientation droite) et l'autre Gabor à 45° à gauche (orientation gauche). L'un des Gabors avait un fort contraste (100%) et l'autre un faible contraste (25%). Leur fréquence spatiale était de 2.5 cycles par degré d'angle visuel et leur enveloppe Gaussienne avait une demi-hauteur de 0.83°. Le Gabor était limité par une ouverture de rayon égal à 3 écart-types de la Gaussienne (Figure 39-bas). La luminance du fond était de 30 cd/m². Les Gabors étaient précédés par une croix de fixation particulière, les lignes *nonius* (Figure 39-haut). Il s'agit de deux demi-croix noires de même contraste, qui se complètent par fusion binoculaire et peuvent ainsi former une croix de fixation. Cette croix, ainsi qu'un cadre de petits carrés blanc et noir présenté autour, permettaient d'imposer une vergence (en évitant donc les mouvements de vergence cherchant la fusion lorsqu'en rivalité). Les carrés et la croix ne présentaient aucune disparité.

VI.B.3 Matériel

Pour la présentation des stimuli en rivalité binoculaire, un stéréoscope précisément calibré a été utilisé. Cet appareil est formé de 4 miroirs sur un banc optique permettant de séparer les images présentées à chaque œil. La distance au stimulus estimée par l'angle de convergence des yeux était la même que la distance estimée à partir de la distance focale par accommodation (indices absolus). Cette distance était de 87 cm. Le programme était écrit sur Matlab et utilisait des fonctions de la PsychToolbox (Brainard, 1997; Pelli, 1997). Il opérait sur un Macintosh G3 connecté à un écran CRT de 21 pouces (30 x 40 cm) à une résolution de 1280 x 960 px et un rafraîchissement

de 75 Hz. Le dispositif était complété par un repose-menton qui limitait les mouvements de la tête du sujet et la pièce était obscurcie.

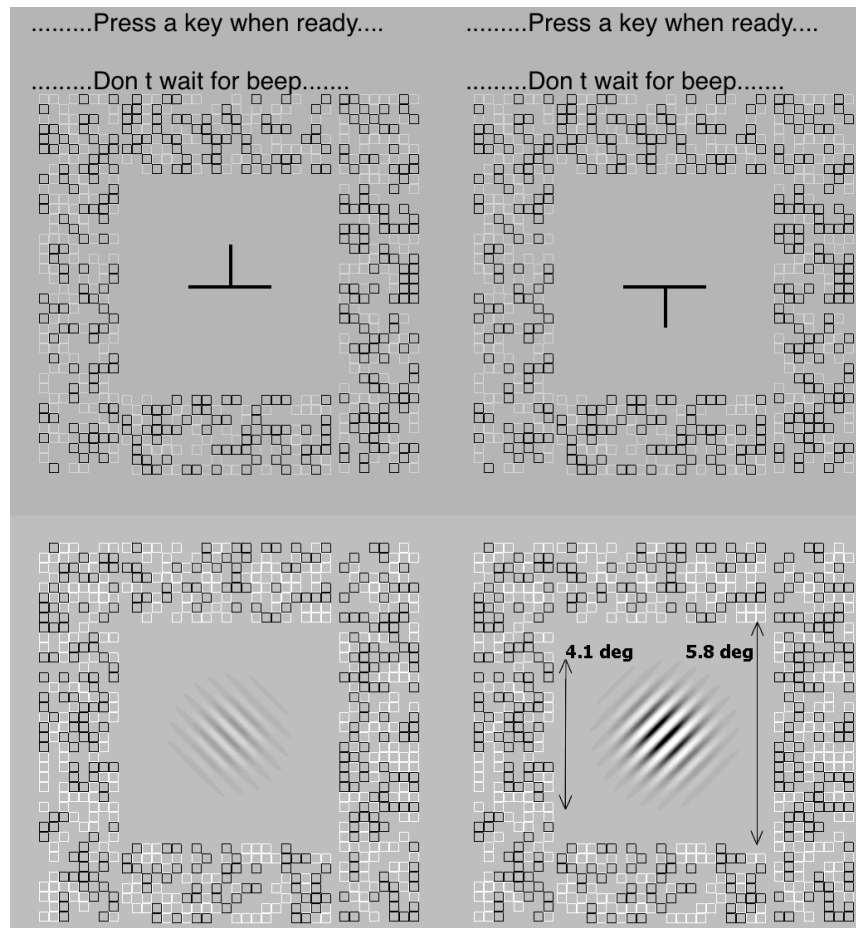


Figure 39 : Stimuli utilisés dans l'expérience de l'étude 5. Panneau du haut, lignes nonius entourées des carrés aidant à la fusion avec vergence correcte. Panneau du bas : Gabors présentés. La colonne de gauche correspond à l'image présentée dans l'œil gauche et la colonne de droite à l'image de l'œil droit.

VI.B.4 Procédure

Un *épisode bistable* correspond à une présentation des stimuli pendant 30 secondes pendant lesquelles l'observateur doit rapporter à l'aide du clavier sa perception (orientation gauche ou droite) au moment où celle-ci change. Chaque épisode bistable était précédé par l'apparition des lignes nonius et du cadre de carrés, de manière à imposer la bonne vergence au sujet. Celui-ci déclenchait alors la présentation des stimuli en appuyant sur une touche quand sa vergence était stable, ce qui provoquait aussi la disparition des lignes nonius. L'expérience était divisée en 5 blocs de 10 épisodes bistables. Lorsqu'aucune réponse n'était donnée sur le premier percept, l'épisode était interrompu et recommencé. Comme le stimulus était relativement grand (4.2°), en cas de

mélanges des deux images, l'observateur devait rapporter la dominance au centre du Gabor. Les épisodes étaient séparés par une seconde d'écran noir. Pour chaque bloc, un épisode truqué (*catch run*) était ajouté : pendant le déroulement en apparence normal de l'épisode, la rivalité était brusquement remplacée par un Gabor non bistable pendant 3 périodes de 7 secondes (aux temps 3, 13 et 23). Le but était de vérifier que les sujets ne percevaient pas de bistabilité sans rivalité binoculaire (ou ne répondaient pas au hasard). Ces épisodes furent analysés à part. Au début de l'expérience, quatre épisodes de familiarisation furent administrés. D'un épisode sur l'autre, les choix de contraste et d'orientation pour un œil étaient aléatoires et les deux choix indépendants.

VI.C Résultats

VI.C.1 Préférence transitoire

L'expérience totalise 19800 renversements. Là encore, la courbe de préférence transitoire (Figure 40) suit un déroulement proche de celui observé par Mamassian et Goutcher (2005) avec une phase biaisée initiale et une phase stationnaire : elle commence quasiment à 1 en faveur du percept de fort contraste puis décroît asymptotiquement en phase stationnaire.

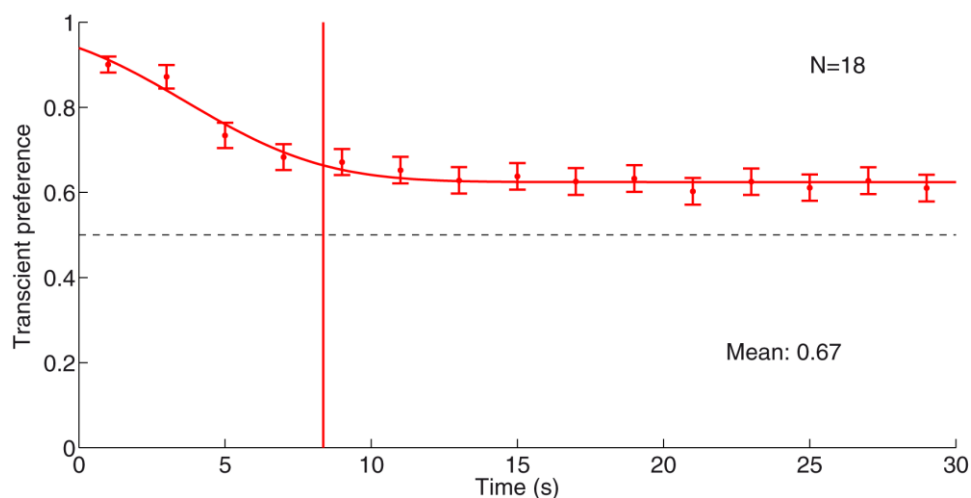


Figure 40 : Préférence transitoire du Gabor de fort contraste. L'axe temporel correspond au temps d'un épisode bistable. Les données sont moyennées sur tous les épisodes et tous les observateurs. Les points sont bien ajustés par une courbe exponentielle décroissante qui signe le passage d'un régime biaisé initial à un régime stationnaire. La ligne verticale décrit le moment de la transition. Les barres d'erreur sont des erreurs standards obtenues par bootstrap.

VI.C.2 Durées de phase

Les durées de phases diminuent exponentiellement (donc linéairement sur l'échelle logarithmique de la Figure 41) avec le numéro de phase. Une ANOVA à mesures répétées trouve un

effet significatif du numéro de phase pour les stimuli de fort contraste ($F(4,17) = 10.715$; $p < 0.0001$) et de faible contraste ($F(4,17) = 2.17$; $p = 0.03$). Les statistiques ne portent que sur les 5 premières phases de chaque percept car au moins un sujet ne présentait pas de 6^e phase (et le design à mesures répétées ne tolère pas les données manquantes). L'effet de l'ordre du percept existe même sans la première phase (fort contraste : $F(3,17) = 5.69$; $p < 0.005$; faible contraste : $F(3,17) = 3.21$; $p = 0.03$).

Lors des épisodes truqués, tous les observateurs ont répondu en accord avec le passage en perception non-bistable dans un délai de 3 secondes, et n'ont pas rapporté de renversement ensuite pendant la période critique (entre 3 et 7 secondes après le début du passage).

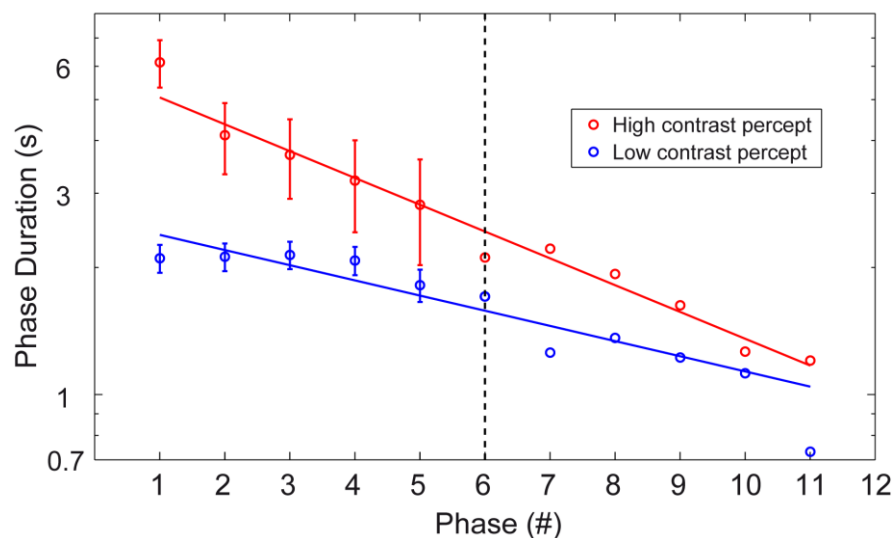


Figure 41 : Durée de phase en fonction du numéro de phase. Cercles ouverts rouges : phases du stimulus de fort contraste ; cercles ouverts bleus : phases du stimulus de faible contraste. L'ajustement est linéaire dans un repère logarithmique. Les barres d'erreurs sont les intervalles de confiance à 95% à mesures répétées (Masson & Loftus, 2003). Ces intervalles n'existent pas après la ligne pointillée noire car un sujet au moins n'a alors pas de phase correspondante.

VII. Discussion de l'étude 3

Tout d'abord, nous avons trouvé un contrôle volontaire plus efficace sur le percept non-favorisé au début des épisodes bistables, ce qui est un autre élément en faveur de mécanismes spécifiques aux premiers percepts (partie I).

Mamassian et Goutcher (2005) trouvent un changement progressif de la dominance entre un régime biaisé et un régime stationnaire. Il est théoriquement possible d'obtenir ces données avec un premier percept bien plus long que les autres et les suivants de durée identique, à

condition que cette première durée de percept soit aussi très variable. Ainsi, Pressnitzer et Hupé (2006) ont trouvé une différence tranchée entre le premier percept de rivalité de plaids et les suivants (Figure 8) : ces derniers avaient tous une durée similaire. En rivalité binoculaire par contre, cette différence n'a pas été retrouvée (Rubin & Hupé, 2005). Cependant, l'étude utilisait une rivalité de mouvement et des contrastes équilibrés entre les images des deux yeux, tandis que Mamassian et Goutcher ont utilisé une grille orientée de fort contraste et une de faible contraste. Ici, nous avons reproduit des conditions expérimentales proches de celles de Mamassian et Goutcher et nous trouvons la même transition progressive entre un régime biaisé et un régime stationnaire, visible aussi dans les durées de phases. Le premier percept n'est donc pas le seul à être différent des autres, ce qui n'est pas mesurable lorsque le biais initial est trop faible.

En introduction, nous avons vu que certains auteurs (Carter & Cavanagh, 2007) avaient trouvé une préférence rétinotopique forte et idiosyncrasique sur le premier percept de la rivalité binoculaire : une orientation était fortement privilégiée à une certaine position par rapport au point de fixation. Mais ces auteurs n'ont finalement relevé que le premier percept d'un épisode bistable. A partir des éléments de notre étude, il est possible que le biais rétinotopique trouvé dans l'expérience (Carter & Cavanagh, 2007) ne soit pas non plus spécifique au premier percept, mais qu'il existe une transition progressive entre une rivalité biaisée et un régime stationnaire.

CHAPITRE 5 : NIVEAU HIERARCHIQUE DE LA COMPETITION ENTRE ORIENTATIONS EN RIVALITE BINOCULAIRE

VIII. Introduction

Nous avons vu que les orientations représentées dans le système perceptif pouvaient être proches de celles présentées physiquement ou subir des illusions comme l'illusion d'orientations superposées, centre-pourtour ou l'illusion de Zöllner. La compétition en rivalité a-t-elle lieu entre orientations illusoires ou physiques ? De même, la vision stéréoscopique utilise-t-elle les orientations illusoires ou physiques ?

Lorsque des différences d'orientation existent entre les deux yeux (disparité d'orientation), le système visuel en déduit généralement de la profondeur. Pour des réseaux, cela correspond à une inclinaison de surface. Lorsque cette disparité est trop grande (plus de 25°), la rivalité apparaît. [See also **Error! Reference source not found.**]. Prenons la plus grande disparité d'orientation compatible avec une fusion et présentons-la. Si une illusion d'orientation était créée de manière monoculaire, serait-il possible d'augmenter la disparité d'orientation à l'aide de cette illusion? Si tel était le cas, le stimulus en fusion passerait alors en rivalité binoculaire. De même, un stimulus en rivalité pourrait être ramené en fusion avec l'illusion inverse.

L'objectif de cette quatrième étude est donc de découvrir s'il est possible de modifier le point de transition entre fusion et rivalité avec une illusion proche de celle de Zöllner. Nous plaçons de courtes lignes sur des réseaux présentant une disparité d'orientation entre les yeux. Si l'illusion de Zöllner était monoculaire, ces courtes lignes pourraient repousser les réseaux orientés et augmenter ou diminuer leur disparité d'orientation. Un résultat positif signifierait que la rivalité et la vision stéréoscopique sont résolues à un niveau de la hiérarchie fonctionnelle qui est postérieur à l'illusion d'orientation de type Zöllner. Cette illusion aurait donc lieu de manière monoculaire et l'illusion pourrait s'ajouter entre les yeux.

IX. Étude 4 : La rivalité binoculaire et la stéréopsie utilisent les orientations perçues illusoires et non les orientations réelles

Je reproduis ci-après le manuscrit de l'article en préparation.

Stereopsis and rivalry are based on perceived rather than physical orientations

Authors:

Adrien Chopin^{1,2}, Pascal Mamassian^{1,2} and Randolph Blake^{3,4}

Affiliation:

¹ Université Paris Descartes, Sorbonne Paris Cité, Paris, France

² CNRS UMR 8158, Laboratoire Psychologie de la Perception, Paris, France

³ Vanderbilt Vision Center, Psychology Department, Vanderbilt University, Nashville TN, USA

⁴ Brain and Cognitive Sciences, Seoul National University, Seoul ROK

Introduction

When a physical stimulus is displayed, several steps are necessary for a perceptive attribute like color or orientation to become conscious. These computational steps involve transduction namely a linear or log-linear transformation from the physical dimension to the perceptive attribute. After transduction, a series of steps contrasting different aspects of the stimulus makes the percept different from the displayed stimulus. Although functionally important and normal, these contrasting steps are often thought to be responsible for illusions. We begin with an example for the color attribute. Transduction of light with specific wavelengths is operated by three pools of cones tuned to three wavelength ranges. Color is extracted by a first contrast between these pools. A second contrast occurs between the chromatic signal at a specific location and the chromatic context around it. Thus, when two physically identical patches are display, they can sometimes appear colored differently because of the chromatic induction that has contrasted the color of the patches with the color contexts around the patches. A natural question is whether such physically identical but perceptively different stimuli will fuse or engage in rivalry? For color, only perceptively different stimuli engage in rivalry (Andrews & Lotto, 2004; Hong & Shevell, 2008). Conversely, physically different stimuli can only fuse if they are similar after chromatic induction. In other words, rivalry and fusion are decided after the level of chromatic induction. While the question has been addressed for color, the similar question remains open for orientation.

Orientation is an important visual attribute because it is the base for high level visual tasks such as object recognition (Marr, 1982). Oriented contours are extracted by integrating local activity from aligned contrast-computing cells (Hubel & Wiesel, 1962). Orientations at neighboring or superimposed locations are then contrasted. This computation generates the tilt illusion that refers to two potentially distinct illusions. The first is a *center-surround contrast*: orientations between a central patch and a surrounding patch repulse each other when their orientations are almost the same (Blakemore, Carpenter, & Georgeson, 1970; Carpenter & Blakemore, 1973). The second is a *superimposed tilt illusion*: the difference with the center-surround contrast is that the two orientations are displayed at the same location. Rao (1977) reported that center-surround repulsion disappears when the surround is suppressed from awareness by a rivalrous high contrast patch: unfortunately, the author did not provide any quantitative measure. A few years later, Wade (1980) showed that Rao's report could actually be explained by a 50% inter-ocular transfer of the center-surround repulsion. He provided quantitative evidence that the repulsion survives the rivalry suppression. This result suggests that orientation contrast between center and surround occurs before the level of rivalry suppression. Half inter-ocular transfer can be interpreted as follows: the repulsion is the sum of

two center-surround repulsion at the monocular and binocular levels. However, such an interocular transfer was not confirmed in another study (Walker, 1978b).

The superimposed tilt illusion has been extensively measured (Gibson & Radner, 1937a; O'Toole & Wenderoth, 1977; Over et al., 1972): it leads to a similar repulsion as the center-surround contrast. To the best of our knowledge, it has not been studied in binocular rivalry conditions. The superimposed tilt illusion is very likely related to the Zöllner illusion (Zöllner, 1860). In the Zöllner illusion, the perceived orientation of long lines is influenced by orientation of superimposed short lines (*inducers*, see Figure 1a). However some differences exist with the superimposed tilt illusion. For large angles (50-90°), the superimposed tilt illusion becomes a reduction of perceived angles (indirect effect: Gibson & Radner, 1937a; O'Toole & Wenderoth, 1977). On the contrary, the Zöllner illusion remains an augmentation of angles for those angles (Morinaga, 1933; according to Kitaoka & Ishihara, 2000). Squires (1956) reported that the orientation deviation produced in the Zöllner illusion could produce stereo depth when orientation is different between eyes. Unfortunately, he did not provide any quantitative measurements and others have failed to report depth produced from illusory orientation differences in such conditions (Julesz, 1971; Ogle, 1962). To the best of our knowledge, no other work has attempted to confirm or disconfirm these last reports. In addition, there is a lack of data about the nature of the orientations engaged in rivalry: are they oriented like the physical orientations before the occurrence of any contrasts or like the illusory orientations that are generated after those contrasts?

In the present study, both questions were addressed by investigating whether a superimposed orientation illusion (based on the Zöllner illusion) could influence the transition between stereopsis and rivalry. When a difference in orientation between monocular grids (orientation disparity) exists (Figure 1b), observers perceive a stereo slant (Figure 1c). If orientation disparity is increased, fusion soon fails and the grids engage in rivalry. Imagine that grids with the orientation disparity near the transition between fusion and rivalry are displayed and we add short fused lines (*inducers*) to the grid. If the orientation illusion occurs monocularly, some inducers will increase the orientation disparity of the grids and others will decrease it. If stereopsis and rivalry use the illusory orientations, grid orientations could be perceptually changed so that they can now be fused and produce stereo depth, and conversely, they could be pushed into rivalry. Transition points between fusion and rivalry would be shifted by different inducers.

Figure 1 about here

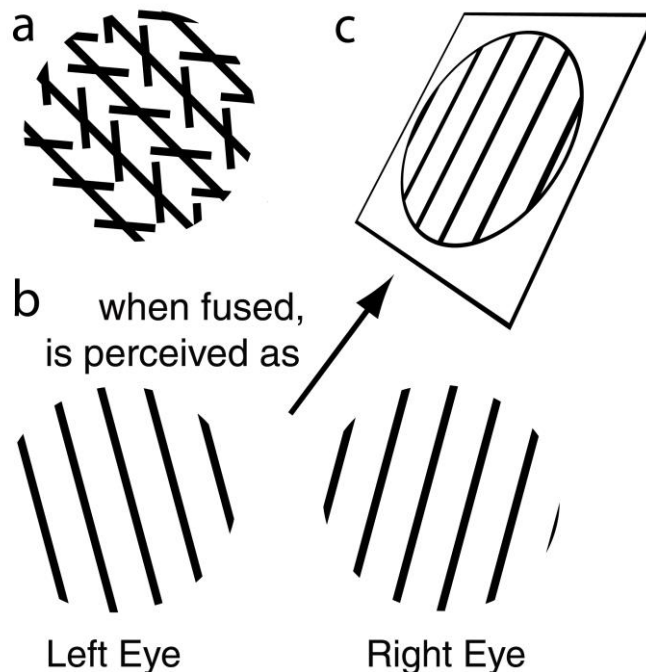


Figure 1

Stimuli; a) Zöllner illusion: long lines do not appear parallel although they are parallel. Inducers change the perceived orientations of the long lines; b) left and right eye images are fused into a slanted surface (c) because of the orientation difference between eyes.

Methods

Stimulus and material

Gratings were vertical grids of black lines (width: 0.02° , luminance: 3 cd.m^{-2} , spatial frequency: 2 cpd) embedded in a Gaussian envelope (0.5° at half height). Twenty black segments (inducers) were added to the display in several conditions: their location was random and their length was 0.8° . Stimuli were displayed through a circular aperture of 4.2° with a central red fixation dot. Background luminance was 15 cd.m^{-2} (line contrast: 0.8). Stimuli were displayed for 2 sec (experiment 1) or 3 sec (experiment 2). Vergence was maintained by a group of small white squares surrounding the stimuli. Binocular rivalry was achieved by using a

modified Wheatstone stereoscope with a chin rest in a darkened room. Distance between the screen and the observer was 61.5 cm. Stimuli were displayed on a 21-in. CRT monitor at a frame rate of 120 Hz and a resolution of 1,280 x 960 pixels. Stimuli were generated with the PsychToolBox library (Brainard, 1997; Pelli, 1997) on a G5 Macintosh computer.

Observers

Eight observers (1 woman, 7 men) with normal or corrected vision (Snellen acuity equal or greater than 20/30) participated in the experiment. All observers had normal far acuity, color vision, no lateral or vertical far phoria, no lateral near phoria and far and near stereo perception of less than 25 seconds of arc. Six of the eight observers were naïve as to the purpose of the experiment.

Procedure

In Experiment 1, the grid orientation difference (disparity) between the eyes was varied according to a staircase procedure. When such orientation disparity exists and fusion is still possible, observers perceived the grid as a surface slanted in depth, either uphill or downhill. Observers were asked to report that slant (uphill or downhill). The goal of the staircase was to find the orientation difference for which observers were at chance (50% correct) when reporting the surface slant. Staircase core was an adaptive stochastic approximation procedure (Kesten, 1958). For each condition, two independent staircases were run, one starting at 10° of orientation disparity and the other at 30°. All staircases were intermixed between conditions. When the two staircases of a condition did not converge to the same value, they were automatically run again. It was decided that two staircases did not converge when the distance between converging values was more than 3 times their average standard deviation (after a maximum likelihood estimation fit with a Gaussian cumulative function).

Observers run five conditions. In all conditions, inducers, when present, were always displayed identically in the two eyes. The two first conditions contrasted the inducers influence. In the *vertical inducer* condition, inducers were vertical and a shift of perception toward rivalry was expected if orientation illusion occurred. Conversely, in the *horizontal inducer* condition, inducers were horizontal and a slight shift toward fusion was expected if orientation illusion occurred. In a neutral *no inducer* condition, the absence of inducers allowed us to assess the influence of the inducer themselves, independently of their orientation. Finally, the two last conditions allowed us to test for an alternative hypothesis about the way inducers could interfere with fusion when oriented in the same way as the grid. Average difference between inducer orientation and grid orientation was 20° (added between eyes) in the vertical condition versus 156° in the horizontal condition, for the observed average orientation disparities at the transition

points between rivalry and fusion. The purpose of the $+30^\circ$ and -30° conditions was to vary that difference between conditions (here, 136°) and to check whether the inducers effect varies accordingly. In the $+30^\circ$ condition, inducers were oriented 30° relatively to the grid in one eye so that perception was maximally pushed toward rivalry in that eye, and has the same way orientation in the other eye. In the other eye, inducers were almost parallel to the grid (1°) so that almost no effect was expected for that eye. Expected effect in the $+30^\circ$ conditions is then the same as vertical condition (near doubled in one eye added to near zero in the other). In the $[-30^\circ]$ condition, inducers were oriented 30° relatively to the grid in one eye so that perception was maximally pushed toward fusion in that eye. Thus, inducers were oriented around 44° relative to the grid in the other eye, so that little effect is expected in that eye. Consequently, expected effect is the same in the -30° condition as in horizontal one. However, difference between inducers and the grid was 31° in $+30^\circ$ condition and 77° in -30° condition thus producing a difference between conditions of 46° . In summary, expected difference between the $+30^\circ$ and -30° conditions was the same as between horizontal and vertical conditions but differences in orientations between inducers and grid was only 46° (against 136°).

In Experiment 2, the transition point m observed in the *no inducer* condition (experiment 1) was taken and 7 orientation disparities were selected equally distributed between $(m-2)$ standard deviations and $(m+2)$ standard deviations. Each chosen orientation disparity was administered twenty times with the “no inducers” stimulus and the following task. First, observers were asked to report whether the stimulus was bistable. If the stimulus was not bistable, they were asked to report the perceived surface slant.

Statistics were ANOVA comparisons. Normality hypothesis could not be rejected for every sample (Kolmogorov-Smirnov test; $p > 0.27$) and statistics were adjusted for sphericity by the Greenhouse-Geisser coefficient.

Results

In figure 2, probability of depth failure is expressed as a function of orientation disparity. The transition point between fusion and rivalry is defined as the orientation disparity for which probability of depth failure is 25% (i.e. at midway between 0% representing full fusion and 50% representing chance performance due to rivalry). Large and consistent differences were found between transition points in the vertical and horizontal conditions ($F(1,7) = 10.4$, $p = 0.015$). As expected, the transition point in the vertical condition was smaller than the one in the horizontal condition: we interpret this difference as the influence of the inducers. The inducers pushed the

grids toward rivalry in the vertical condition and toward fusion in the horizontal condition, in a manner consistent with the orientation illusion they can trigger monocularly.

Figure 2 about here

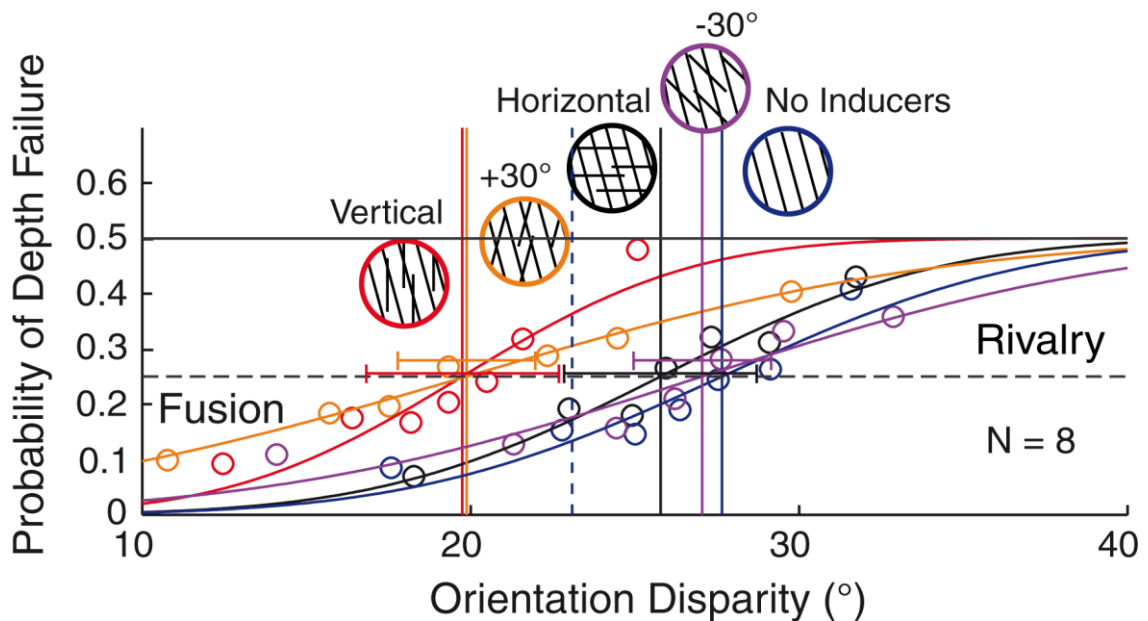


Figure 2

Experiment 1; Probability of failure in estimating the grid slant as a function of the difference in grid orientation between eyes. Depth perception at chance (horizontal black solid line) means rivalry. The five conditions are vertical inducers (red), horizontal inducers (black), +30° (orange), -30° (purple) and no inducers (blue). Open circles are data from the staircases, averaged between observers and split into 7 bins. Solid curves are maximum likelihood estimates with a cumulative Gaussian curve. Horizontal black dashed line indicates the 75% correct performance for depth perception. Vertical colored solid lines depict transition points for each condition. Dashed blue line indicates the average transition point for all the conditions except for the no inducer condition. Error bars are within-subject 95%-confidence intervals (Masson & Loftus, 2003) for the horizontal/vertical comparison and the +30°/-30° comparison.

The transition point in the neutral condition appears larger than in any other inducer condition, but the difference with the mean of all other conditions (blue dashed line in Figure 2) is not statistically significant (only a trend exists: $F(7,1) = 4.3$, $p = 0.077$). This result suggests that inducers may have the general effect of compromising fusion. If this effect was dependant of the orientation difference between the grid and the inducers, it could explain the difference found between the horizontal and vertical conditions (anti-fusion hypothesis). Thus, as stated in the methods, the difference between the grid and the inducers was 20° in the vertical condition and 156° in the horizontal condition for a difference between conditions of 136° . The same difference was only 46° between the $+30^\circ$ condition and the -30° condition. According to the anti-fusion hypothesis, the transition points should be much closer between the $+30^\circ$ and the -30° conditions than between the horizontal and vertical conditions. The same large difference was found between the $+30^\circ$ and the -30° conditions ($F(1,7) = 32.2$, $p = 0.001$; see Figure 3) and this difference was not statistically different from the difference between the horizontal and vertical conditions ($F(1,7) = 0.38$, $p > 0.10$).

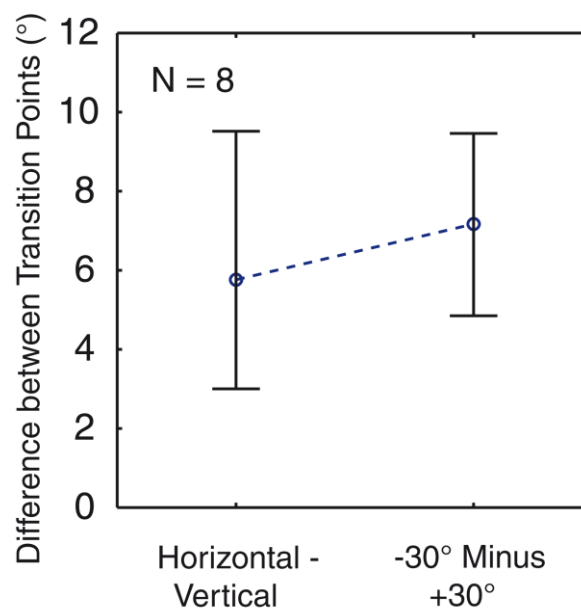


Figure 3

Average difference between the transition points in the horizontal and vertical conditions and in the $+30^\circ$ and -30° conditions, for all observers. Error bars are bootstrapped 95%-confidence intervals.

In the first experiment, we measured only the depth perception and concluded from its absence that rivalry occurred. After the loss of depth perception when orientation disparities are too large, it is still possible that no rivalry occurs. A percept of mixed eyes fusion with no depth information would be perceived and rivalry would occur for even larger orientation disparities. We refer to this possibility as the hypothesis of *neither rivalry nor depth*. We tested this hypothesis with Experiment 2. In that experiment, phenomenological perception of rivalry was first reported, and perceived depth was measured when rivalry was reported absent. If the hypothesis of neither rivalry nor depth is correct, there would be orientation disparities for which no rivalry is reported and at the same time, depth perception would be at chance. Figure 4a plots the proportion of trials where rivalry is reported as a function of orientation disparities. Orientation disparities larger than 30° result in rivalry more than 50% of the time. For those orientation disparities, when no rivalry is reported, depth perception occurs: Figure 4b depicts the proportion of correct responses when depth is reported. Observers are thus able to report the slant of the grid with a low error rate. In summary, observers perceive either depth or rivalry.

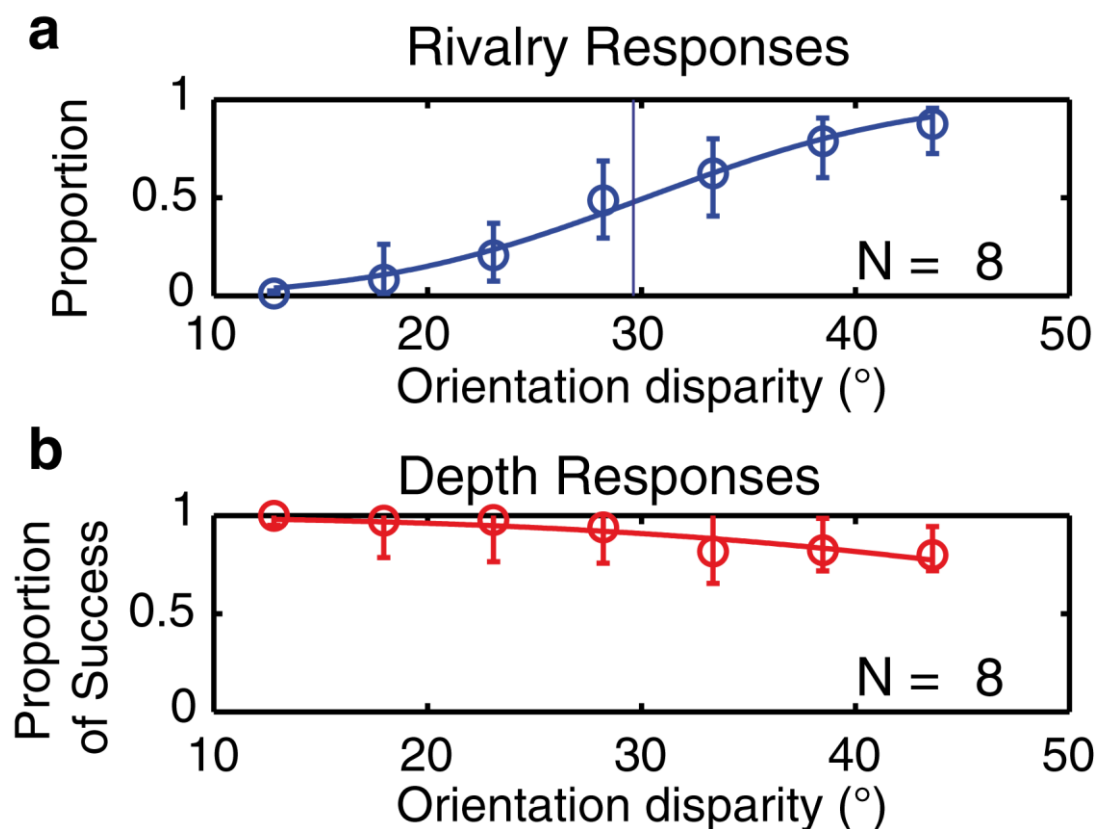


Figure 4

Experiment 2: Phenomenology; a) Average proportion of rivalry responses among all the responses as a function of orientation disparity, for all observers. Vertical solid line indicates the 50% value. b) Proportion of successful depth estimation among depth responses as a function of orientation disparity. Error bars are bootstrapped 95%-confidence intervals.

Discussion

We investigated whether the transition point between stereo-fusion and rivalry could be changed by induction of illusory shifts in perceived orientation. In experiment 1, the large difference between the horizontal and vertical inducer conditions provided evidence that it is possible.

The neutral condition (with no inducers) exhibited a transition point similar to those recently found by others (Buckthought et al., 2008). Introducing inducers tended to prevent fusion of the grids, independently of their orientation. This tendency could vary with the orientation of the inducers and their difference. The same large difference found between the +30° and -30° conditions confirmed that this effect does not vary as a function of the difference in orientation between the inducers and the grid and therefore could not explain the results.

We interpret our results as follows: Each Zöllner-like orientation illusion occurs monocularly and rivalry and stereopsis are generated from these illusory orientations rather than the displayed orientations.

The conclusion about stereopsis comes naturally from the data because depth perception was measured. An additional measure is necessary to strictly extend our findings to the perception of rivalry. In Experiment 2, we confirmed that absence of depth perception results in rivalry, rather than in a fusion with no depth signal.

The results may be the consequence of the depth contrast, which is a repulsion between stereo-defined objects (Ogle, 1946): A line or a slanted surface defined in depth by the stereo cue is repulsed away from another surface at the same location that is slanted approximately the same way. When the grid as well as the inducers are fused, two planes exist, one fronto-parallel (inducers) and one slanted (the grid). It is likely that observers experience these planes with a slightly different slant so that their slants are actually repelled away from each other. However, there would be no difference between vertically oriented and horizontally oriented inducers : they generate the same fronto-parallel surface that triggers the same 3D plane repulsion.

Our findings do not mirror what has been found with motion. An illusion similar to the Zöllner illusion but in motion, is the motion repulsion (Marshak & Sekuler, 1979). Some researchers (Chen, Matthews, & Qian, 2001) found that no motion repulsion exists between the directions of random dot surfaces while these surfaces are in motion binocular rivalry. This suggests that the motion repulsion occurs after the motion binocular rivalry suppression site.

In conclusion, we demonstrated that orientation illusion (Zöllner) occurs monocularly before convergence of the eye signals, i.e. before fusion-stereopsis or rivalry is resolved.

References

- Andrews, T. J., & Lotto, R. B. (2004). Fusion and rivalry are dependent on the perceptual meaning of visual stimuli. *Current Biology*, 14(5), 418–423.
- Blakemore, C., Carpenter, R. H. S., & Georgeson, M. A. (1970). Lateral Inhibition between Orientation Detectors in the Human Visual System. *Nature*, 228(5266), 37-39. doi: 10.1038/228037a0.
- Brainard, D. H. (1997). The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*, 10(4), 433-436.
- Buckthorpe, A., Kim, J., & Wilson, H. R. (2008). Hysteresis effects in stereopsis and binocular rivalry. *Vision Research*, 48(6), 819-830. Retrieved July 5, 2011, .
- Carpenter, R. H. S., & Blakemore, C. (1973). Interactions between orientations in human vision. *Experimental Brain Research*, 18(3), 287–303.
- Chen, Y., Matthews, N., & Qian, N. (2001). Motion rivalry impairs motion repulsion. *Vision research*, 41(27), 3639–3647.
- Gibson, J. J., & Radner, M. (1937). Adaptation, after-effect, and contrast in the perception of tilted lines. II. Simultaneous contrast and the areal restriction of the after-effect. *Journal of Experimental Psychology*, 20(6), 553-569.
- Hong, S. W., & Shevell, S. K. (2008). Binocular rivalry between identical retinal stimuli with an induced color difference. *Visual neuroscience*, 25(03), 361–364.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *The Journal of Physiology*, 160(1), 106.
- Julesz, B. (1971). *Foundations of cyclopean vision*. Chicago: University of Chicago.
- Kesten, H. (1958). Accelerated stochastic approximation. *The Annals of Mathematical Statistics*, 41–59.

- Kitaoka, A., & Ishihara, M. (2000). Three Elemental Illusions Determine the Zollner Illusion. *Perception and Psychophysics*, 62(3), 569–575.
- Marr, D. (1982). *Vision: A computational approach*. Freeman & Co., San Francisco.
- Marshak, W., & Sekuler, R. (1979). Mutual repulsion between moving visual targets. *Science*, 205(4413), 1399.
- Masson, M. E. J., & Loftus, G. R. (2003). Using Confidence Intervals for Graphically Based Data Interpretation. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 57(3), 203-220.
- Morinaga, S. (1933). A study of the Zöllner illusion. *Japanese Journal of Psychology*, 8, 195–242.
- O’Toole, B., & Wenderoth, P. (1977). The tilt illusion: Repulsion and attraction effects in the oblique meridian. *Vision Research*, 17(3), 367-374. Retrieved April 26, 2011, .
- Ogle, K. N. (1946). The binocular depth contrast phenomenon. *The American Journal of Psychology*, 59(1), 111–126.
- Ogle, K. N. (1962). The optical space sense. In H. Davson (Ed.), *The eye* (Academic Press, Inc., Vol. 4, pp. 288-290). New York.
- Over, R., Broerse, J., & Crassini, B. (1972). Orientation illusion and masking in central and peripheral vision. *Journal of Experimental Psychology*, 96(1), 25.
- Pelli, D. G. (1997). The VideoToolbox software for visual psychophysics: transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, 10(4), 437-442.
- Rao, V. M. (1977). Tilt illusion during binocular rivalry. *Vision Research*, 17(2), 327-328. Retrieved March 18, 2010, .
- Squires, P. C. (1956). Stereopsis produced without horizontally disparate stimulus loci. *Journal of Experimental Psychology*, 52(3), 199–203.
- Wade, N. J. (1980). The influence of colour and contour rivalry on the magnitude of the tilt illusion. *Vision Research*, 20(3), 229–233.

Walker, P. (1978). Orientation-selective inhibition and binocular rivalry. *Perception*, 7(2), 207 – 214. doi: 10.1068/p070207.

Zöllner, F. (1860). Über eine neue Art von Pseudoskopie und ihre Beziehungen zu den von Plateau und Opper beschriebenen Bewegungsphaenomenen. *Annual Review of Physical Chemistry*, 186, 500-523. Retrieved August 7, 2011.

Acknowledgments

This work was supported by a grant from the French Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, by a travel grant from Université Paris Descartes, by a grant from the National Institutes of Health (EY13358) and by the WCU program through the National Research Foundation of Korea funded by the Ministry of Education, Science and Technology (R32-10142).

X. Discussion

Nous avons étudié la manière de modifier le point de transition entre fusion et rivalité d'orientation à l'aide de modifications illusoires des orientations monoculaires. Les résultats positifs indiquent que la vision stéréoscopique et la rivalité utilisent les orientations telles que modifiées par l'illusion de Zöllner plutôt que les orientations physiques. Une condition contrôle a permis d'écarter une interprétation alternative des résultats selon laquelle ce serait la faible différence d'orientation entre les grilles en rivalité et les lignes provoquant l'illusion qui interférerait avec la fusion.

Finalement, une deuxième expérience a permis de contrôler qu'une absence de vision stéréoscopique correspond bien à un percept en rivalité plutôt qu'à une fusion sans signal de profondeur. Une critique est que nos données reposent aussi sur le fait que rivalité et vision stéréoscopique sont incompatibles. Toutefois, j'ai développé en introduction (section II.D) les éléments en faveur de l'idée que rivalité d'orientation et vision stéréoscopique d'orientation ne coexistent pas (les données montrent toujours une coexistence sur des registres séparés, comme des fréquences spatiales différentes ou une rivalité de couleur avec une vision stéréoscopique d'orientation). Toutefois, d'autres données indiquent clairement que diplopie et vision stéréoscopique peuvent coexister (e.g. **Error! Reference source not found.**).

Pris ensemble, ces éléments indiquent que le contraste illusoire entre orientations de type Zöllner a lieu avant la résolution de la vision stéréoscopique et de la rivalité.

Dans une troisième expérience (non présentée), nous avons essayé de reproduire le même paradigme en rivalité de mouvement. Une illusion similaire au Zöllner existe dans le domaine du mouvement : la répulsion entre directions de mouvement proches (Marshak & Sekuler, 1979). L'expérience était destinée à tester le niveau d'apparition de cette illusion comparé à celui de la rivalité et de la vision stéréoscopique. Une condition nécessaire à notre expérience était de créer une vision stéréoscopique extraite uniquement à partir du mouvement. Une différence entre les yeux des directions de déplacement de surfaces de points monoculaires est ainsi théoriquement compatible avec une inclinaison de la surface binoculaire. Pour que l'inclinaison en profondeur ne soit pas déduite uniquement à partir des disparités des points, nous avons utilisé des points non-corrélés entre les yeux (ils ne correspondent pas). Pourtant, nous n'avons mesuré aucune perception d'inclinaison avec un tel stimulus, bien qu'une fusion semble avoir lieu. Il s'agit d'un résultat en soi mais cela nous empêche de créer l'équivalent de l'expérience précédente dans le domaine du mouvement.

De plus, des données existent déjà sur la question. En perception du mouvement, une expérience (Chen et al., 2001) montre qu'aucune répulsion n'existe entre des surfaces de points aléatoires en mouvement qui sont elles-mêmes en rivalité de mouvement⁵⁴. Cela signifie que le contraste entre directions de mouvement a lieu après le site de suppression de la rivalité de mouvement. Au contraire, nous avons trouvé que le contraste entre orientations se situe avant le site de suppression de la rivalité d'orientation. La raison de cette différence n'est pas connue mais elle pourrait être fonctionnellement liée à la vision stéréoscopique plutôt qu'à la rivalité. En ayant lieu de manière monoculaire, le contraste entre orientations pourrait avoir pour conséquence d'augmenter l'acuité stéréoscopique (qui est excellente) lorsque deux grilles sont superposées. Par contre, la répulsion entre directions ne peut pas influencer l'acuité de la vision stéréoscopique par disparité de directions de mouvement puisque nous n'avons pas trouvé qu'une telle vision stéréoscopique existait. Cette répulsion peut donc très bien avoir lieu à un plus haut niveau, après la fusion binoculaire.

As a final comment, it is interesting to remark that our times of presentation are long (2s) and the stimuli are not followed by a mask. Because of this, we cannot rule out the possibility of a complex influence of a potentially high level orientation illusion feeding back monocular local orientation processes and that would further influence binocular fusion/stereopsis process. The only of avoiding that is to use a very short presentation time followed by a mask so that no feedback interaction can bias the observed response.

⁵⁴ L'inverse est trouvé pour la répulsion entre mouvements d'un centre et d'un pourtour (Kim & Wilson, 1997; Wiese & Wenderoth, 2010).

CHAPITRE 6 : INFLUENCE DES ATTENTES EN RIVALITE BINOCULAIRE

XI. Introduction

Les études 1 et 2 ont montré que la rivalité était influencée par des traitements probabilistes implicites complexes. Nous avons continué dans cette direction en étudiant dans quelle mesure l'histoire perceptive lointaine pouvait influencer la rivalité binoculaire. Nous avons vu en introduction que l'adaptation était un mécanisme important de la rivalité (section IV.A). Cette adaptation a une influence non-seulement à court-terme mais aussi à très long-terme dans le cas des visages, de la couleur ou de l'orientation (section IV.F). Cette nouvelle étude rassemble des données sur ce qu'il se passe à moyen terme pour l'orientation. Nous avons vu que les théories actuelles de l'adaptation sont la correction d'erreur, le recalibrage, le cadre Bayésien ou la décorrélation (section IV.E). Si le système visuel implémentait une correction d'erreur (cf. IV.E.2), il ferait l'hypothèse que les orientations sont uniformément distribuées dans le monde, ce que nous pouvons tester. Si au contraire, la distribution des orientations dans le monde était mesurée plutôt qu'estimée uniforme, il existerait une relation positive entre percept actuel et une histoire plus ou moins ancienne des percepts précédents (plus le percept a été vu dans le passé, plus il est perçu dans le présent), ce qui serait incompatible avec les théories actuelles de l'adaptation.

L'étude consiste à présenter des séries de réseaux orientés suivies de réseaux en rivalité d'orientation. L'observateur doit rapporter son premier percept et nous essayons de découvrir la relation existante entre ce percept et ce qui a été présenté jusqu'à 40 min plus tôt.

XII. Étude 5 : Propriétés prédictives de l'adaptation

Je reproduis ici l'article tel que soumis à la revue *Current Biology*.

XIII. Discussion

Nous avons analysé la relation entre le percept courant et les réseaux orientés présentés. Une fenêtre temporelle d'analyse incorporant un nombre de séries variables et pouvant être déplacée dans le passé, a permis d'analyser l'effet du passé sur le percept courant, indépendamment de l'effet de l'histoire récente. Nous avons trouvé une relation de dépendance négative entre le percept courant et les réseaux présentés récemment (la centaine la plus récente), ce qui correspond à une adaptation. De manière surprenante, à moyen terme (plus particulièrement dans un groupe d'environ 300 événements visuels présentés 200 événements à distance du percept actuel), nous avons trouvé une forte relation de dépendance positive : plus les réseaux orientés d'une certaine manière ont été présentés dans cette fenêtre temporelle passée, plus ils sont perçus dans le présent.

Le modèle simple et quantitatif proposé (appelé *adaptation prédictive*) peut expliquer les deux types de relations (négative et positive). Le système visuel mesure la proportion d'un certain type d'évènement (une orientation) dans un groupe d'essais du passé. Il considère ensuite la distribution de ces proportions comme une référence, c'est-à-dire comme représentant la distribution des orientations dans le monde. Il prédit qu'il mesurera la même distribution d'orientations dans les essais récents. La conséquence de cette prédiction du système visuel est le recalibrage de la sensibilité à ces événements de manière à ce que les distributions correspondent, lorsque ce n'est pas le cas. Si une proportion d'orientations gauches dans les essais récents est mesurée plus grande que dans la référence, la sensibilité à l'orientation gauche devrait diminuer. Il est surprenant que le système mette à jour en permanence les proportions mesurées dans la référence et le groupe récent. L'utilisation de cette fenêtre glissante signifie en effet que l'intégralité de la série d'évènements est stockée, et pas seulement les valeurs des proportions. Le mécanisme que nous proposons est très similaire à celui qui produit le biais de représentativité en raisonnement (cf. l'exemple de la roulette en section IV.J de l'introduction).

Les implications sont importantes puisqu'aucun modèle actuel de l'adaptation ne peut expliquer les deux relations trouvées. Ainsi, la correction d'erreur prédit que la référence n'est pas mesurée. Le recalibrage et la décorrélation prédisent uniquement une relation négative. Le cadre Bayésien pourrait expliquer uniquement une relation négative ou positive entre percept actuel et passé récent.

Nous testons aussi si l'unité mesurée par le système visuel est l'évènement (apparition d'un réseau orienté) ou les alternances entre évènements (ou les répétitions). Le nombre d'alternances dans l'histoire de référence correspond à une mesure de la vitesse avec laquelle un évènement tend à être remplacé par un autre. Cette mesure est au cœur de certains modèles Bayésiens de

l'adaptation (Barraza & Grzywacz, 2008; Grzywacz & Balboa, 2002). Que se passerait-il si le système visuel prenait comme unité les alternances entre évènements ? Dans ce cas, le nombre d'alternances (ou répétitions) serait mesuré dans la population de référence et dans la population récente. Si le monde visuel était plus stable que précédemment mesuré, le système prédirait un très prochain changement de percept⁵⁵. Cette hypothèse prédit correctement la relation négative entre histoire récente et percept actuel mais pas la relation positive avec un passé plus ancien. L'analyse présentée en Figure Supplémentaire 3 de l'article écarte plus clairement cette hypothèse. Nous montrons donc que c'est la proportion d'un type d'évènement qui doit être égalisée dans les distributions récente et de référence, plutôt que le nombre d'alternances entre ces évènements.

Nous avons répliqué l'analyse des corrélations et des régressions logistiques en incluant les percepts en rivalité et en leur donnant le statut de stimuli présentés. Aucune relation ne survit, ce qui suggère qu'un autre mécanisme existe dans le calcul des proportions, dont le rôle est de pondérer un évènement par sa fiabilité. Une très faible fiabilité serait associée à un évènement perceptif issu de stimuli ambigus, comme ceux en rivalité binoculaire.

Notre modèle fonctionne correctement pour une série d'évènements discrets. Mais comment passer à un flux continu ? Il n'est probablement pas besoin de passer à un flux continu dans la mesure où les travaux récents en perception ambiguë montrent que l'attention discrétise le flux visuel en une série d'évènements avec une fréquence d'environ 13 Hz (VanRullen, 2006; VanRullen & Koch, 2003). Or, le modèle s'applique tout aussi bien à des évènements discrets durant 70 ms qu'à des évènements durant 500 ms.

Il est difficile de généraliser nos conclusions à l'adaptation d'autres attributs à partir de nos seuls résultats sur l'adaptation à l'orientation. Plusieurs études récentes ont trouvé des résultats similaires dans l'adaptation à des catégories d'objets (Daelli et al., 2010) ou à un mouvement (Kanai & Verstraten, 2005) : un délai court (moins d'une seconde) entre stimulus adaptant et test (ISI) provoque une adaptation tandis qu'un délai plus long (quelques secondes) résulte en un amorçage. Dans ces études, les stimuli adaptants sont présentés pendant un temps très court (300 ms) en comparaison de notre expérience. Le modèle que nous avons créé ne peut pas expliquer un effet positif aussi rapide avec un stimulus présenté si brièvement. S'il explique le stockage des effets consécutifs, notre modèle est une simplification et pour expliquer le décours temporel précis des effets consécutifs, il nécessite un aménagement. L'aménagement consiste simplement à calculer une moyenne des évènements récents qui est pondérée exponentiellement de manière à favoriser les

⁵⁵ Toutefois, cette hypothèse implique que la sensibilité à une orientation puisse être changée drastiquement (inversée) à l'apparition de chaque nouvel évènement, ce qui est peu plausible.

plus récents : il existe bien dans nos données un effet assez fort du tout dernier évènement visuel avant l'évènement en rivalité. Cet aménagement permettrait de diminuer l'effet d'un stimulus adaptant très court après un ISI de plusieurs secondes mais pas d'obtenir un inversement de l'adaptation, comme rapporté dans les travaux mentionnés. Deux options sont possibles. La taille du groupe d'évènements récents pris en considération pourrait simplement être beaucoup plus petite pour le mouvement et la catégorisation (moins de 3 s) que pour les orientations (3 min). Il est enfin possible que ces études sur mouvement et catégorisation reflètent plutôt un effet de mémoire additionnel sans rapport avec nos résultats.

Une critique de notre modèle est qu'il ne peut pas rendre compte du paradoxe de distance et de l'effet indirect s'il était appliqué à la modélisation des effets consécutifs. Un nouvel aménagement serait nécessaire. Néanmoins, les autres théories de l'adaptation nécessitent le même aménagement : la diminution de la sensibilité des canaux proches du stimulus adaptant et de la sélectivité des canaux éloignés (cf. section IV.C.5 de l'introduction). Une manière d'appliquer ceci à notre modèle pourrait être la suivante. L'activité du canal est pondérée par la probabilité prédite que l'orientation codée par le canal soit le prochain évènement visuel (ce qui diminue la sensibilité autour du stimulus adaptant). La modification de sélectivité des canaux éloignés s'applique aussi (ce qui implémente l'effet indirect). Les pics d'activité de la distribution de l'activité des canaux correspondent au percept final.

Enfin, la procédure de l'expérience impliquait de rapporter la fréquence spatiale plutôt que l'orientation pendant la rivalité binoculaire. Cette manipulation avait pour but d'orienter l'attention du sujet sur une dimension non-pertinente. Pour cela, des différences de fréquences spatiales entre les yeux furent introduites. Nous avons vu en introduction (section II) que la littérature est divisée sur la question de la rivalité entre fréquences spatiales (mais tout de même largement en faveur de son absence). Si cette rivalité existe, on ne sait pas dans quelle mesure elle est indépendante de la compétition interoculaire ou inter-orientation. Il est possible qu'un percept mixte apparaisse (fréquence d'un œil avec orientation de l'autre œil). Nous discutons de l'existence de ces percepts mixtes pour la couleur en section II.A.4 de l'introduction : leur probabilité ne dépasse pas 20%. Toutefois, si je pouvais refaire cette expérience aujourd'hui, j'introduirais une différence sur un attribut dont on est sûr qu'il est complètement immunisé contre la rivalité binoculaire.

Finalement, il est légitime de se demander pourquoi le système visuel agirait de la sorte ? Quel bénéfice tirerait-il à utiliser ce mécanisme ? Notamment, il faut noter que la théorie classique du recalibrage permet tout-à-fait au système de corriger les erreurs des détecteurs défectueux et aussi de créer une constance perceptive malgré des changements d'environnements. Toutefois, parce que le recalibrage ne prend en compte que la moyenne de la distribution observée plutôt que toute la distribution, le processus est moins précis. Ainsi, si la distribution est symétrique mais

favorise des éléments opposés, le système sera également sensible à ces éléments qu'à d'autres beaucoup moins fréquents mais également répartis et opposés. Par exemple, les cardinaux et les diagonales sont (deux à deux) de même fréquence. Or les cardinaux sont beaucoup plus fréquents que les diagonales et le système visuel est plus sensible aux cardinaux. Là où le recalibrage prédit une même sensibilité aux cardinaux et diagonales à cause de la moyenne, notre modèle, qui implique toute la distribution, va favoriser les cardinaux.

CHAPITRE 7 : DISCUSSION ET PERSPECTIVES

XIV. Etudes 1 et 2

Dans une première étude, nous avons examiné l'influence de l'utilité en vision bistable : un percept qui aide à effectuer une tâche avec succès est plus utile comparé à un autre percept qui rend la tâche plus difficile. Nous avons trouvé qu'une interprétation utile est perçue plus souvent que l'autre sur le premier percept d'un épisode de rivalité binoculaire. Cette influence est implicite et non-attentionnelle. Elle implique des calculs probabilistes complexes sur l'utilité d'un percept.

La deuxième étude avait pour objectif de découvrir s'il est possible de modifier un biais perceptif en rivalité de transparence de mouvement. Ce stimulus bistable présente en effet des préférences fortes, stables et spécifiques à l'observateur dont l'origine est inconnue. Nous avons montré que l'utilité peut modifier ses biais et qu'ils ont donc pour rôle de favoriser la réussite à une tâche.

Dans les deux études, l'apprentissage s'est avéré durable même lorsque le percept utile est redevenu neutre. Dans cette thèse, je me suis concentré sur la mise en évidence de ce nouveau résultat mais il serait maintenant intéressant d'étudier dans quelle mesure cet apprentissage est durable. Trois questions concernent la dynamique une fois l'apprentissage produit :

(1) En l'absence du percept utile, combien de temps l'apprentissage perdure ?

(2) Lorsque le percept utile redevient neutre, combien de temps faut-il pour que le système réapprenne que le stimulus est neutre. Dans nos études, la durée de retour à la neutralité a été trop courte pour répondre à cette question.

(3) Finalement, on sait depuis longtemps qu'une fois qu'une séquence de mots est apprise puis oubliée, l'apprendre à nouveau prend moins de temps que l'apprentissage initial (Ebbinghaus, 1885). Est-ce aussi le cas de l'apprentissage de l'utilité d'un percept ?

Nous avons vu en introduction une situation dans laquelle l'utilité peut peut-être modifier la perception (l'exemple de l'artilleur). Existe-t-il d'autres situations expérimentales qui pourraient mettre en jeu l'utilité d'un percept ? Atteindre une cible avec un tir d'artillerie est assez similaire à l'atteinte d'une position cible à l'aide d'une saccade oculaire. Dans les deux cas, la distance de la cible doit être estimée pour que l'action soit efficace. Il existe notamment une situation de laboratoire dans laquelle une erreur constante de visée est produite : *l'adaptation saccadique* (Collins, 2007; Collins, Doré-Mazars, & Lappe, 2007; Collins, Vergilino-Perez, Delisle, & Doré-Mazars, 2008; Georg & Lappe, 2009; Hernandez, Levitan, Banks, & Schor, 2008; Pélisson, Alahyane,

Panouillères, & Tilikete, 2009). L'adaptation est produite avec un paradigme de double saut. Il est demandé à l'observateur de faire une saccade vers une cible. Pendant la préparation de celle-ci, la cible change de position (par exemple, s'éloigne). La saccade étant trop courte, une saccade de correction a lieu. Rapidement, la saccade de correction devient inutile car la saccade initiale s'allonge : c'est l'adaptation saccadique. Est-ce que le signal d'erreur se répercute jusqu'aux stades perceptifs, jusqu'à la partie du système visuel qui s'occupe d'estimer l'excentricité de la cible ? L'excentricité perçue devrait alors augmenter pendant l'adaptation saccadique. Cette plus grande excentricité est moins probable d'un point de vue Bayésien mais plus utile pour la tâche de saccade. L'adaptation étant spécifique à la direction de la saccade, une expérience a estimé cette excentricité perçue en la comparant avec une cible présentée de l'autre côté, en l'absence de toute saccade (Moidell & Bedell, 1988). Même en l'absence de saccade, l'excentricité perçue est modifiée par l'adaptation saccadique (dans la proportion de 25% de correction visuelle, 75% de correction motrice). L'utilité pourrait influencer l'apparence visuelle dans des contextes qui vont au-delà de celui de la bistabilité.

Est-ce que cela veut pour autant dire que le calcul d'utilité se fait à un haut niveau cognitif ? Dans une expérience récente (Seitz et al., 2009), l'effet de la récompense interne sur l'apprentissage perceptif a été trouvé spécifique à l'œil de présentation et ayant lieu avant le site de suppression de la rivalité binoculaire. Il est donc envisageable que le calcul de l'utilité modifiant l'apparence du stimulus ait lieu à un bas niveau de la hiérarchie cognitive. La réussite à la tâche (récompense) est par contre forcément calculée au niveau de la tâche (ou à un niveau supérieur) et répercutée aux niveaux inférieurs.

XV. Etudes 3 et 4

La troisième étude montre que le premier percept de rivalité binoculaire n'est pas le seul à être différent des autres. Il s'agit d'une transition progressive entre un régime initial et un régime stationnaire, sur plusieurs percepts. Cette transition est retrouvée pour 4 types de stimuli bistables dans différentes conditions de contrôle volontaire. Ce contrôle est lui-même plus efficace au début de l'épisode bistable (pour le stimulus le moins favorisé). Que ces biais initiaux existent est donc maintenant bien établi.

La quatrième étude se focalise sur les mécanismes d'apparition de la bistabilité. Elle examine l'impact d'une illusion d'orientation sur la rivalité binoculaire et la vision stéréoscopique. La différence d'orientation entre les yeux peut créer de la profondeur ou de la rivalité binoculaire. Nous avons trouvé qu'une illusion de type Zöllner pouvait modifier monoculairement les orientations de manière à augmenter ou diminuer cette différence d'orientation. Des réseaux en

fusion peuvent ainsi devenir bistables suite à l'action de cette illusion. L'étape de traitement illusoire des orientations occupe donc une position hiérarchique plus basse que les étapes de vision stéréoscopique et de rivalité.

XVI. Etude 5

La dernière étude considère le rôle du passé visuel sur la rivalité binoculaire. D'autres travaux ont montré un effet d'adaptation par rapport au passé récent. Nous avons trouvé l'inverse pour un passé plus ancien : plus une certaine orientation est présentée, plus elle est ensuite perçue en rivalité. Nous proposons un nouveau modèle d'adaptation : l'adaptation prédictive. Selon ce modèle, l'adaptation a lieu parce que le système visuel tente de prédire le prochain percept à partir du passé. Si une orientation est plus fréquente dans le passé récent que dans le passé ancien, cette orientation sera moins perçue et vice versa.

Ici encore, de complexes calculs probabilistes influencent l'apparence en bistabilité et la question du niveau cognitif de ces calculs et de leur généralité reste ouverte. Il serait bien-sûr intéressant dans un premier temps de tester d'autres attributs comme la couleur ou le mouvement. Etant donné que le mécanisme de l'adaptation prédictive s'apparente à un biais de représentativité locale retrouvé à un niveau cognitif aussi haut que le raisonnement, il est probable que le mécanisme se retrouve à tous les niveaux qui peuvent s'adapter. Par contre, même si en théorie, la fonction cognitive peut travailler sur n'importe quel contenu, du moment qu'il s'agit d'évènements, il est plus probable que la fonction soit spécifique à un contenu et donc localisée au niveau où ce contenu est traité. En effet, le système a besoin que les adaptations prédictives sur les différents contenus aient lieu en même temps.

Il serait intéressant de tester la rétinotopie de ces calculs : il est possible que le groupe d'évènements récents soit mesuré à une position rétinotopique tandis que le groupe d'évènements de référence accumule les évènements quel que soit leur position rétinotopique. Une expérience récente (Bompas & O'Regan, 2006) suggère plutôt que la rétinotopie est complète (pour le groupe récent et de référence). Dans cette étude qui porte sur l'adaptation à la couleur spécifique à la direction d'une saccade, une condition contrôle est conduite. Celle-ci implique de fixer une croix tandis que des patchs de couleur apparaissent séquentiellement à gauche et à droite de cette croix. Le patch de gauche est toujours rouge et celui de droite, toujours vert. Après 40 min, l'adaptation est testée à ces positions et aucune adaptation n'est retrouvée. Ce résultat est difficilement compréhensible vis-à-vis des théories actuelles de l'adaptation mais peut s'expliquer avec

l'adaptation prédictive⁵⁶ : au bout de 40 min, les groupes récent et de référence sont saturés d'évènements « rouge » (ou « vert ») de telle manière que le prochain évènement n'est pas prédit plus rouge que vert. Il faut pour cela que groupes récent et de référence soient rétinotopiques. Il faut toutefois rester prudent quant au résultat de Bompas et O'Regan (2006) car la tâche dans cette condition contrôle portait sur la croix de fixation : l'attention était donc focalisée sur cette croix. Or, certaines expériences montrent une interaction entre attention et adaptation (Bahrami, Carmel, Walsh, Rees, & Lavie, 2008; Kanai, Tsuchiya, & Verstraten, 2006; Shin, Stolte, & Chong, 2009; Yang, Blake, & McDonald, 2010).

Finalement, notre modèle fait de surprenantes prédictions. La première prédiction est celle développée en introduction à propos de l'effet consécutif martien : après une longue durée passée exclusivement à percevoir le même évènement visuel, aucun effet consécutif ne devrait apparaître, au contraire d'une durée courte. Voici une deuxième prédiction. Si une orientation droite est présentée répétitivement pendant une quinzaine de minutes, entrecoupé d'essais en rivalité, la perception des orientations en rivalité sera d'abord très biaisée vers l'orientation gauche (effet de l'histoire récente). Puis cet effet devrait diminuer jusqu'à disparaître complètement au fur et à mesure que l'histoire de référence se sature d'évènements « orientation droite » : il y aurait alors autant d'orientations droites dans les populations récentes et de référence. Si l'on présentait à nouveau une série d'évènements dont la répartition était équilibrée entre orientations droites et gauches, il y aurait alors temporairement moins d'orientations droites dans le passé récent que dans la référence : le système prédirait alors des orientations droites. Autrement dit, un effet consécutif inversé (positif) est attendu dans cette situation.

Je termine cette discussion par une critique plus générale des études présentées ici : nous n'avons pas contrôlé les mouvements oculaires. Ils étaient même libres sauf dans l'étude 5. Même si les éléments en défaveur du rôle des saccades dans le contrôle volontaire ou dans les renversements ont été développés (section I.C.7 de l'introduction), il existe une stratégie efficace pour des observateurs bien informés. Lorsqu'il existe des différences d'orientation entre les yeux (ce qui ne concerne donc pas l'étude 2), un mouvement oculaire le long de l'orientation visible crée une perturbation dans l'autre œil et peut donc déclencher un renversement⁵⁷ (Blake, 2001). Nous avons néanmoins discuté les éléments qui rendent cette possibilité improbable pour l'étude 1. Il manque aussi une motivation pour que les observateurs utilisent cette technique dans les autres expériences.

⁵⁶ L'expérience est très proche de l'exemple de l'image consécutive martienne développé en introduction.

⁵⁷ Merci de diffuser le moins possible l'existence de cette technique à un public de non-spécialistes.

XVII. Conclusion

Nous avons donc clairement établi que l'apparence d'un percept bistable peut être influencée par des calculs probabilistes, comme l'utilité ou un conditionnement probabiliste, et des prédictions basées sur la fréquence d'occurrence d'évènements visuels (adaptation prédictive). Nous avons aussi précisé le rôle de préférences initiales, la spécificité des premiers percepts bistables et le niveau d'apparition de l'illusion de Zöllner relativement à la rivalité binoculaire. Cette thèse s'est complètement focalisée sur une approche psychophysique de la perception ambiguë : les futurs développements pourront s'élargir à la question des bases cérébrales des fonctions que nous avons découvertes. La nature probabiliste de ces calculs et notamment l'importante quantité d'évènements visuels nécessairement stockés pour obtenir l'adaptation prédictive apparaissent d'ores et déjà comme un défi à l'implémentation biologique.

RÉFÉRENCES

- Adams, W. J., & Mamassian, P. (2002). Common mechanisms for 2D tilt and 3D slant after-effects. *Vision Research*, 42(23), 2563–2568.
- Addams, R. (1834). An account of a peculiar optical phenomenon seen after having looked at a moving body. *London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science*, 5, 373–374.
- Ahissar, M., & Hochstein, S. (1993). Attentional control of early perceptual learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 90(12), 5718.
- Ahissar, M., & Hochstein, S. (1997). Task difficulty and the specificity of perceptual learning. *Nature*, 387(6631), 401–406.
- Alais, D., & Blake, R. (1999). Grouping visual features during binocular rivalry. *Vision Research*, 39(26), 4341–4353.
- Alais, D., van Boxtel, J. J., Parker, A., & van Ee, R. (2010). Attending to auditory signals slows visual alternations in binocular rivalry. *Vision Research*, 50(10), 929–935. doi: 16/j.visres.2010.03.010.
- Alais, D., Cass, J., O’Shea, R. P., & Blake, R. (2010). Visual Sensitivity Underlying Changes in Visual Consciousness. *Current Biology*, 20(15), 1362–1367. doi: 16/j.cub.2010.06.015.
- Alter, A. L., & Oppenheimer, D. M. (2006). From a fixation on sports to an exploration of mechanism: The past, present, and future of hot hand research. *Thinking & Reasoning*, 12(4), 431–444.
- Andrews, D. P. (1964). Error-correcting perceptual mechanisms. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 16(2), 104–115.
- Andrews, T. J. (2001). Binocular rivalry and visual awareness. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(10), 407–409.
- Andrews, T. J., & Lotto, R. B. (2004). Fusion and rivalry are dependent on the perceptual meaning of visual stimuli. *Current Biology*, 14(5), 418–423.
- Andrews, T. J., & Purves, D. (1997). Similarities in normal and binocularly rivalrous viewing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 94(18), 9905.
- Anstis, S. M. (1975). What does visual perception tell us about visual coding. *Handbook of psychobiology*, 269–323.
- Anstis, S., Verstraten, F. A. ., & Mather, G. (1998). The motion aftereffect. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(3), 111–117.
- Bahrami, B., Carmel, D., Walsh, V., Rees, G., & Lavie, N. (2008). Spatial attention can modulate unconscious orientation processing. *Perception*.
- Ball, K., & Sekuler, R. (1987). Direction-specific improvement in motion discrimination. *Vision Research*, 27(6), 953–965.

- Barlow, H. B. (1990). A theory about the functional role and synaptic mechanism of visual after-effects. In C. B. Blakemore (Ed.), *Vision: Coding and efficiency*. Cambridge University Press.
- Barlow, H. B., & Foldiak, P. (1989). Adaptation and decorrelation in the cortex. In C. Miall, R. M. Durbin, & G. J. Mitchison (Eds.), *The computing neuron* (Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., pp. 54–72). Boston, MA, USA.
- Barlow, H. B., & Hill, R. M. (1963). Evidence for a physiological explanation of the waterfall phenomenon and figural after-effects. *Nature*, *200*(4913), 1345–1347. doi: 10.1038/2001345a0.
- Barraza, J. F., & Grzywacz, N. M. (2008). Speed adaptation as Kalman filtering. *Vision Research*, *48*(23-24), 2485–2491.
- Barry, S. R. (2009). *Fixing My Gaze: a Scientist's Journey into Seeing in Three Dimensions*. New York: Basic Books.
- Baum, W. M. (1979). Matching, undermatching, and overmatching in studies of choice. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, *32*(2), 269.
- Belmore, S. C., & Shevell, S. K. (2008). Very-long-term chromatic adaptation: Test of gain theory and a new method. *Visual Neuroscience*, *25*(03), 411–414.
- van den Berg, A. V., & van Loon, E. M. (2005). An invariant for timing of saccades during visual search. *Vision Research*, *45*(12), 1543–1555. doi: 16/j.visres.2004.12.018.
- Berg, P. S. ., & Toch, H. H. (1964). " Impulsive" and " Neurotic" Inmates: A Study in Personality and Perception. *The Journal of Criminal Law, Criminology, and Police Science*, 230–234.
- Blake, R. (1981). Binocular rivalry and perceptual inference. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *29*(1), 77–78.
- Blake, R. (1988). Dichoptic reading: The role of meaning in binocular rivalry. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *44*(2), 133–141.
- Blake, R. (1989). A neural theory of binocular rivalry. *Psychological Review*, *96*(1), 145–167.
- Blake, R. (2001). A primer on binocular rivalry, including current controversies. *Brain and Mind*, *2*(1), 5–38.
- Blake, R. (2005). Landmarks in the history of binocular rivalry. In D. Alais & R. Blake (Eds.), *Binocular rivalry* (pp. 1–27). Cambridge, MA: MIT Press.
- Blake, R., & Boothroyd, K. (1985). The precedence of binocular fusion over binocular rivalry. *Perception and Psychophysics*, *37*(2), 114–124.
- Blake, R., & Camisa, J. (1978). Is binocular vision always monocular. *Science*, *200*(4349), 1497–1499.
- Blake, R., & Camisa, J. (1979). On the inhibitory nature of binocular rivalry suppression. *Journal of Experimental Psychology*, *5*(2), 315–323.
- Blake, R., & Fox, R. (1974). Adaptation to invisible gratings and the site of binocular rivalry suppression. *Nature*, *249*(456), 488–490.

- Blake, R., & Logothetis, N. K. (2002). Visual competition. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(1), 13–21.
- Blake, R., & O'Shea, R. P. (1988). "Abnormal Fusion" of Stereopsis and Binocular rivalry. *Psychological Review*, 95, 151–154. Retrieved February 11, 2009, .
- Blake, R., O'Shea, R. P., & Mueller, T. J. (1992). Spatial zones of binocular rivalry in central and peripheral vision. *Visual Neuroscience*, 8(05), 469–478.
- Blake, R., & Overton, R. (1979). The site of binocular rivalry suppression. *Perception*, 8(2), 143–152.
- Blake, R., Overton, R., & Lema-Stern, S. (1981). Interocular transfer of visual aftereffects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7(2), 367.
- Blake, R. R., Fox, R., & McIntyre, C. (1971). Stochastic properties of stabilized-image binocular rivalry alternations. *Journal of Experimental Psychology*, 88(3), 327–32.
- Blake, R., Sobel, K. V., & Gilroy, L. A. (2003). Visual motion retards alternations between conflicting perceptual interpretations. *Neuron*, 39(5), 869–878.
- Blake, R., Tadin, D., Sobel, K. V., Raissian, T. A., & Chong, S. C. (2006). Strength of early visual adaptation depends on visual awareness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(12), 4783–4788. doi: 10.1073/pnas.0509634103.
- Blake, R., Westendorf, D. H., & Overton, R. (1980). What is suppressed during binocular rivalry. *Perception*, 9(2), 223–231.
- Blake, R., Yu, K., Lokey, M., & Norman, H. (1998). Binocular Rivalry and Motion Perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10(1), 46–60. doi: 10.1162/089892998563770.
- Blake, R., Zimba, L., & Williams, D. (1985). Visual motion, binocular correspondence and binocular rivalry. *Biological Cybernetics*, 52(6), 391–397. doi: 10.1007/BF00449596.
- Blakemore, C. (1970). A new kind of stereoscopic vision. *Vision Research*, 10(11), 1181–1182.
- Blakemore, C., & Campbell, F. W. (1969a). Adaptation to spatial stimuli. *The Journal of Physiology*, 200(1), 11P–13P. Retrieved February 20, 2011, .
- Blakemore, C., & Campbell, F. W. (1969b). On the existence of neurones in the human visual system selectively sensitive to the orientation and size of retinal images. *The Journal of Physiology*, 203(1), 237.
- Blakemore, C., Carpenter, R. H. S., & Georgeson, M. A. (1970). Lateral Inhibition between Orientation Detectors in the Human Visual System. *Nature*, 228(5266), 37–39. doi: 10.1038/228037a0.
- Blakemore, C., & Sutton, P. (1969). Size adaptation: a new aftereffect. *Science*, 166(902), 245–247. Retrieved February 10, 2011, .
- Block, N. (2005). Two neural correlates of consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(2), 46–52.
- Bompas, A., & O'Regan, J. K. (2006). More evidence for sensorimotor adaptation in color perception. *Journal of Vision*, 6(2), 145–153. doi: 10.1167/6.2.5.

- Bonneh, Y. S., Cooperman, A., & Sagi, D. (2001). Motion-induced blindness in normal observers. *Nature*, *411*, 798–801.
- Bosking, W. H., Zhang, Y., Schofield, B., & Fitzpatrick, D. (1997). Orientation Selectivity and the Arrangement of Horizontal Connections in Tree Shrew Striate Cortex. *Journal of Neuroscience*, *17*(6), 2112–2127.
- Bossink, C., Stalmeier, P., & de Weert, C. M. M. (1993). A test of Levelt's second proposition for binocular rivalry. *Vision Research*, *33*(10), 1413–1419.
- Bradley, A., & Schor, C. (1988). The role of eye movements and masking in monocular rivalry. *Vision Research*, *28*(10), 1129–1137.
- Brainard, D. H. (1997). The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision*, *10*(4), 433–436.
- Brascamp, J. W., van Ee, R., Noest, A. J., Jacobs, R. H., & van den Berg, A. V. (2006). The time course of binocular rivalry reveals a fundamental role of noise. *Journal of Vision*, *6*(11), 8. doi: 10.1167/6.11.8.
- Brascamp, J. W., van Ee, R., Pestman, W. R., & van den Berg, A. V. (2005). Distributions of alternation rates in various forms of bistable perception. *Journal of Vision*, *5*(4), 287–298.
- Brascamp, J. W., Knapen, T. H. ., Kanai, R., Noest, A. J., van Ee, R., & van den Berg, A. V. (2008). Multi-timescale perceptual history resolves visual ambiguity. *PLoS ONE*, *3*(1).
- Brascamp, J. W., Knapen, T. H. J., Kanai, R., van Ee, R., & van den Berg, A. V. (2007). Flash suppression and flash facilitation in binocular rivalry. *Journal of Vision*, *7*(12), 1–12. doi: 10.1167/7.12.12.
- Brascamp, J. W., Pearson, J., Blake, R., & van den Berg, A. V. (2009). Intermittent ambiguous stimuli: Implicit memory causes periodic perceptual alternations. *Journal of Vision*, *9*(3), 3.
- Braun, J., & Mattia, M. (2010). Attractors and noise: Twin drivers of decisions and multistability. *NeuroImage*, *52*(3), 740–751. doi: 16/j.neuroimage.2009.12.126.
- Bravo, M. J., & Nakayama, K. (1992). The role of attention in different visual-search tasks. *Perception & Psychophysics*, *51*(5), 465–472.
- Breese, B. B. (1899). On Inhibition. *Psychological Revue (Monographs Supplements)*, *3*, 1–65.
- Breese, B. B. (1909). Binocular rivalry. *Psychological Review*, *16*(6), 410–415.
- Bregman, A. S. (1994). *Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound*. The MIT Press.
- Brenner, R. L., Charles, S. T., & Flynn, J. T. (1969). Pupillary responses in rivalry and amblyopia. *Archives of ophthalmology*, *82*(1), 23.
- Bressloff, P. C., & Webber, M. A. (2011). Neural field model of binocular rivalry waves. *Journal of Computational Neuroscience*. doi: 10.1007/s10827-011-0351-y.
- Bridgeman, B., Hendry, D., & Stark, L. (1975). Failure to detect displacement of the visual world during saccadic eye movements. *Vision Research*, *15*(6), 719–722.

- Buckthought, A., Kim, J., & Wilson, H. R. (2008). Hysteresis effects in stereopsis and binocular rivalry. *Vision Research*, 48(6), 819–830. Retrieved July 5, 2011, .
- Campbell, F. W., & Maffei, L. (1971). The tilt after-effect: A fresh look. *Vision Research*, 11(8), 833–840. doi: 10.1016/0042-6989(71)90005-8.
- Carlson, T. A., & He, S. (2000). Visible binocular beats from invisible monocular stimuli during binocular rivalry. *Current Biology*, 10(17), 1055–1058.
- Carney, T. (1997). Evidence for an early motion system which integrates information from the two eyes. *Vision Research*, 37(17), 2361–2368. doi: 10.1016/S0042-6989(97)00053-9.
- Carpenter, R. H. S., & Blakemore, C. (1973). Interactions between orientations in human vision. *Experimental Brain Research*, 18(3). doi: 10.1007/BF00234599.
- Carter, O., & Cavanagh, P. (2007). Onset rivalry: Brief presentation isolates an early independent phase of perceptual competition. *PLoS ONE*, 2(4), 343.
- Carter, O. L., Campbell, T. G., Liu, G. B., & Wallis, G. (2004). Contradictory influence of context on predominance during binocular rivalry. *Clinical and Experimental Optometry*, 87(3), 153–162.
- Carter, O. L., & Pettigrew, J. D. (2003). A common oscillator for perceptual rivalries. *Perception*, 32(3), 295–305.
- Cave, C. B., Blake, R., & McNamara, T. P. (1998). Binocular rivalry disrupts visual priming. *Psychological Science*, 9(4), 299–302.
- Chen, X., & He, S. (2004). Local Factors Determine the Stabilization of Monocular Ambiguous and Binocular Rivalry Stimuli. *Current Biology*, 14(11), 1013–1017. doi: 10.1016/j.cub.2004.05.042.
- Chen, Y., Matthews, N., & Qian, N. (2001). Motion rivalry impairs motion repulsion. *Vision Research*, 41(27), 3639–3647.
- Chong, S. C., & Blake, R. (2006). Exogenous attention and endogenous attention influence initial dominance in binocular rivalry. *Vision Research*, 46(11), 1794–1803.
- Chong, S. C., Tadin, D., & Blake, R. (2005). Endogenous attention prolongs dominance durations in binocular rivalry. *Journal of Vision*, 5(11). doi: 10.1167/5.11.6.
- Christopher deCharms, R., & Merzenich, M. M. (1996). Primary cortical representation of sounds by the coordination of action-potential timing. *Nature*, 381, 13.
- Chun, M. M. (2000). Contextual cueing of visual attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(5), 170–178.
- Chun, M. M., & Jiang, Y. (1999). Top-Down Attentional Guidance Based On Implicit Learning of Visual Covariation. *Psychological Science*, 10(4), 360–365.
- Clifford, C. W. ., Webster, M. A., Stanley, G. B., Stocker, A. A., Kohn, A., Sharpee, T. O., et al. (2007). Visual adaptation: neural, psychological and computational aspects. *Vision Research*, 47(25), 3125–3131.

- Clifford, C. W. ., Wyatt, A. M., Arnold, D. H., Smith, S. T., & Wenderoth, P. (2001). Orthogonal adaptation improves orientation discrimination. *Vision Research*, *41*(2), 151–159.
- Clifford, C. W. G. (2002). Perceptual adaptation: motion parallels orientation. *Trends in Cognitive Sciences*, *6*(3), 136–143. doi: 10.1016/S1364-6613(00)01856-8.
- Clifford, C. W., Wenderoth, P., & Spehar, B. (2000). A functional angle on some after-effects in cortical vision. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *267*(1454), 1705.
- Clotfelter, C. T., & Cook, P. J. (1993). The “ gambler’s fallacy” in lottery play. *Management Science*, *39*(12), 1521–1525.
- Collins, T. (2007). *Conséquences perceptives de la plasticité sensori-motrice du système visuel*. Psychologie Cognitive, Université Paris Descartes.
- Collins, T., Doré-Mazars, K., & Lappe, M. (2007). Motor space structures perceptual space: Evidence from human saccadic adaptation. *Brain Research*, *1172*, 32–39.
- Collins, T., Vergilino-Perez, D., Delisle, L., & Doré-Mazars, K. (2008). Visual versus motor vector inversions in the antisaccade task: a behavioral investigation with saccadic adaptation. *Journal of Neurophysiology*, *99*(5), 2708–2718. doi: 10.1152/jn.01082.2007.
- Crain, K. (1961). Binocular rivalry: Its relation to intelligence, and general theory of its nature and physiological correlates. *Journal of General Psychology*.
- Crick, F., & Koch, C. (1998). Consciousness and neuroscience. *Cerebral Cortex*, *8*(2), 97–107.
- Crosan, R., & Sundali, J. (2005). The gambler’s fallacy and the hot hand: Empirical data from casinos. *Journal of Risk and Uncertainty*, *30*(3), 195–209.
- Daelli, V., van Rijsbergen, N. J., & Treves, A. (2010). How recent experience affects the perception of ambiguous objects. *Brain Research*, *1322*, 81–91. doi: 10.1016/j.brainres.2010.01.060.
- Davis, J. M. (1959). Personality, perceptual defense, and stereoscopic perception. *The Journal of Abnormal and Social Psychology*, *58*(3), 398.
- Dayan, P. (1998). A hierarchical model of binocular rivalry. *Neural Computation*, *10*(5), 1119–1135.
- van De Grind, W. A., van Hof, P., van der Smagt, M. J., & Verstraten, F. A. J. (2001). Slow and fast visual motion channels have independent binocular–rivalry stages. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, *268*(1465), 437–443.
- Van Der Zwan, R., Wenderoth, P., & Alais, D. (1993). Reduction of a pattern-induced motion aftereffect by binocular rivalry suggests the involvement of extrastriate mechanisms. *Visual Neuroscience*, *10*(04), 703–709.
- Deubel, H., & Schneider, W. X. (1996). Saccade target selection and object recognition: Evidence for a common attentional mechanism. *Vision Research*, *36*(12), 1827–1837.
- Diaz-Caneja, E. (1928). Sur l’alternance binoculaire. *Annales D’Oculistique*, *165*(October), 721–731.

- Ding, J., & Levi, D. M. (2011). Recovery of stereopsis through perceptual learning in human adults with abnormal binocular vision. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. doi: 10.1073/pnas.1105183108.
- Dodwell, P. C., & Humphrey, G. K. (1990). A functional theory of the McCollough effect. *Psychological Review*, 97(1), 78–89.
- Dresp, B., Lorenceau, J., & Bonnet, C. (1990). Apparent brightness enhancement in the Kanizsa square with and without illusory contour formation. *Perception*, 19(4), 483–489.
- Duensing, S., & Miller, B. (1979). The Cheshire cat effect. *Perception*, 8(3), 269–273.
- Duncan, J. (1984). Selective attention and the organization of visual information. *Journal of Experimental Psychology: General*, 113(4), 501–517. doi: 10.1037/0096-3445.113.4.501.
- DuTour, E.-F. (1760). Discussion d'une question d'optique (discussion on a question of optics). *l'Académie des Sciences: Mémoires de Mathématique et de Physique Présentés par Divers Savants*, 3, 514–530.
- Ebbinghaus, H. (1885). *Über das gedächtnis: Untersuchungen zur experimentellen psychologie*. Leipzig: Duncker & Humblot.
- van Ee, R. (2005). Dynamics of perceptual bi-stability for stereoscopic slant rivalry and a comparison with grating, house-face, and Necker cube rivalry. *Vision Research*, 45(1), 29–40.
- van Ee, R. (2009). Stochastic variations in sensory awareness are driven by noisy neuronal adaptation: evidence from serial correlations in perceptual bistability. *Journal of the Optical Society of America A*, 26(12), 2612–2622. doi: 10.1364/JOSAA.26.002612.
- van Ee, R., Adams, W. J., & Mamassian, P. (2003). Bayesian modeling of cue interaction: bistability in stereoscopic slant perception. *Journal of the Optical Society of America A*, 20(7), 1398–1406.
- van Ee, R., van Dam, L. C. J., & Brouwer, G. J. (2005). Voluntary control and the dynamics of perceptual bi-stability. *Vision Research*, 45(1), 41–55.
- van Ee, R., van Dam, L. C. J., & Erkelens, C. J. (2002). Bi-stability in perceived slant when binocular disparity and monocular perspective specify different slants. *Journal of Vision*, 2(9), 597–607.
- Einhäuser, W., Stout, J., Koch, C., & Carter, O. (2008a). Pupil dilation reflects perceptual selection and predicts subsequent stability in perceptual rivalry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(5), 1704–1709. Retrieved February 11, 2009, .
- Einhäuser, W., Stout, J., Koch, C., & Carter, O. (2008b). Reply to Hupé et al.: The predictive correlation of pupil dilation and relative dominance durations in rivalry is not a statistical artifact. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(28), E44. Retrieved February 11, 2009, .
- Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415(6870), 429–33.

- Fagard, J., Sacco, S., Yvenou, C., Domellöf, E., Kieffer, V., Tordjman, S., et al. (2008). The role of the corpus callosum in the perception of reversible figures in children. *Vision Research*, 48(23-24), 2451–2455.
- Fahle, M. (1994). Human pattern recognition: parallel processing and perceptual learning. *Perception*, 23(4), 411 – 427. doi: 10.1068/p230411.
- Fahle, M., & Edelman, S. (1993). Long-term learning in vernier acuity: Effects of stimulus orientation, range and of feedback. *Vision Research*, 33(3), 397–412.
- Fahle, M., & Palm, G. (1991). Perceptual rivalry between illusory and real contours. *Biological Cybernetics*, 66(1), 1–8.
- Fan, J., McCandliss, B. D., Sommer, T., Raz, A., & Posner, M. I. (2002). Testing the efficiency and independence of attentional networks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(3), 340–347.
- Favreau, O. E., & Cavanagh, P. (1983). Interocular transfer of a chromatic frequency shift. *Vision Research*, 23(10), 951–957. doi: 16/0042-6989(83)90004-4.
- Fecteau, J. H. (2007). Priming of pop out depends upon the current goals of observers. *Journal of Vision*, 7(6:1), 1–11. doi: 10.1167/7.6.1.
- Fiorentini, A., & Berardi, N. (1980). Perceptual learning specific for orientation and spatial frequency.
- Flitcroft, D. I., & Morley, J. W. (1997). Accommodation in binocular contour rivalry. *Vision Research*, 37(1), 121–125.
- Fox, R., & Check, R. (1966). Forced-choice form recognition during binocular rivalry. *Psychonomic Science*, 6(10), 471–472.
- Fox, R., & Check, R. (1968). Detection of motion during binocular rivalry suppression. *Journal of Experimental Psychology*, 78(3p1), 388.
- Fox, R., & Check, R. (1972). Independence between binocular rivalry suppression duration and magnitude of suppression. *Journal of Experimental Psychology*, 93(2), 283.
- Fox, R., & Herrmann, J. (1967). Stochastic properties of binocular rivalry alternations. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 2(9), 432–436.
- Fox, R., Todd, S., & Bettinger, L. A. (1975). Optokinetic nystagmus as an objective indicator of binocular rivalry. *Vision Research*, 15, 849–853.
- Freeman, A. W. (2005). Multistage model for binocular rivalry. *Journal of Neurophysiology*, 94(6), 4412.
- Fries, P., Roelfsema, P. R., Engel, A. K., Konig, P., & Singer, W. (1997). Synchronization of oscillatory responses in visual cortex correlates with perception in interocular rivalry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(23), 12699.
- Fries, P., Schroder, J. H., Roelfsema, P. R., Singer, W., & Engel, A. K. (2002). Oscillatory Neuronal Synchronization in Primary Visual Cortex as a Correlate of Stimulus Selection. *Journal of Neuroscience*, 22(9), 3739.

- Fukuda, H. (1981). Magnitude of suppression of binocular rivalry within the invisible pattern. *Perceptual and Motor Skills*.
- Garcia, J., & Koelling, R. A. (1966). Relation of cue to consequence in avoidance behavior. *Psychonomic Science*, 4, 123-124.
- Georg, K., & Lappe, M. (2009). Effects of saccadic adaptation on visual localization before and during saccades. *Experimental Brain Research*, 192(1), 9-23. doi: 10.1007/s00221-008-1546-y.
- Georgeson, M. A., & Phillips, R. (1980). Angular selectivity of monocular rivalry: Experiment and computer simulation. *Vision Research*, 20(11), 1007-1013.
- Gepshtein, S., & Kubovy, M. (2005). Stability and change in perception: spatial organization in temporal context. *Experimental Brain Research*, 160, 487-495.
- Gibson, J. J. (1933). Adaptation, after-effect and contrast in the perception of curved lines. *Journal of Experimental Psychology*, 16(1), 1-31.
- Gibson, J. J. (1937). Adaptation with negative after-effect. *Psychological Review*, 44(3), 222.
- Gibson, J. J., & Radner, M. (1937a). Adaptation, after-effect, and contrast in the perception of tilted lines. II. Simultaneous contrast and the areal restriction of the after-effect. *Journal of Experimental Psychology*, 20(6), 553-569.
- Gibson, J. J., & Radner, M. (1937b). Adaptation, after-effect and contrast in the perception of tilted lines. I. Quantitative studies. *Journal of Experimental Psychology*, 20(5), 453-467. doi: 10.1037/h0059826.
- Gigante, G., Mattia, M., Braun, J., & Del Giudice, P. (2009). Bistable Perception Modeled as Competing Stochastic Integrations at Two Levels. *PLoS Computational Biology*, 5(7), e1000430. doi: 10.1371/journal.pcbi.1000430.
- Gilbert, C. D., & Wiesel, T. N. (1983). Clustered intrinsic connections in cat visual cortex. *The Journal of Neuroscience*, 3(5), 1116.
- Gilroy, L. A., & Blake, R. (2005). The interaction between binocular rivalry and negative afterimages. *Current Biology*, 15(19), 1740-1744.
- Girgus, J. J., Rock, I., & Egatz, R. (1977). The effect of knowledge of reversibility on the reversibility of ambiguous figures. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 22(6), 550-556.
- Greenlee, M. W., & Heitger, F. (1988). The functional role of contrast adaptation. *Vision Research*, 28(7), 791-797. doi: 10.1016/0042-6989(88)90026-0.
- Greggers, U., & Mauelshagen, J. (1997). Matching Behavior of Honeybees in a Multiple-Choice Situation: The Differential Effect of Environmental Stimuli on the Choice Process. *Animal Learning and Behavior*, 25(4), 458-472.
- Greggers, U., & Menzel, R. (1993). Memory dynamics and foraging strategies of honeybees. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 32(1), 17-29.

- Grindley, G. C., & Townsend, V. (1965). Binocular masking induced by a moving object. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *17*(2), 97–109.
- Grossberg, S., Yazdanbakhsh, A., Cao, Y., & Swaminathan, G. (2008). How does binocular rivalry emerge from cortical mechanisms of 3-D vision? *Vision Research*, *48*(21), 2232–2250.
- Grzywacz, N. M., & Balboa, R. M. (2002). A Bayesian framework for sensory adaptation. *Neural computation*, *14*(3), 543–559.
- Haijiang, Q., Saunders, J. A., Stone, R. W., & Backus, B. T. (2006). Demonstration of cue recruitment: Change in visual appearance by means of Pavlovian conditioning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *103*(2), 483–488.
- Haines, R. F. (1991). A breakdown in simultaneous information processing. *Presbyopia research. From molecular biology to visual adaptation*, 171–175.
- Hansen, T. (2002). *A neural model of early vision: Contrast, contours, corners and surfaces*. Ulm, Germany: University of Ulm.
- Harris, J. P. (1980). How Does Adaptation to Disparity Affect the Perception of Reversible Figures? *The American Journal of Psychology*, *93*(3), 445–457. doi: 10.2307/1422723.
- Harris, J. P., & Gregory, R. L. (1973). Fusion and rivalry of illusory contours. *Perception*, *2*(2), 235–247.
- Hayashi, R., Maeda, T., Shimojo, S., & Tachi, S. (2004). An integrative model of binocular vision: a stereo model utilizing interocularly unpaired points produces both depth and binocular rivalry. *Vision Research*, *44*(20), 2367–2380.
- Held, R., Ostrovsky, Y., deGelder, B., & Sinha, P. (2008). Revisiting the molyneux question. *Journal of Vision*, *8*(6), 523. doi: 10.1167/8.6.523.
- von Helmholtz, H. (1867). *Treatise on Physiological Optics*. New York: Dover. (First published in 1867, Leipzig: Voss).
- von Helmholtz, H. (1911). *Treatise on Physiological Optics* (J. P. Southall, Ed., Vol. 3). New York: Optical Society of America.
- Hernandez, T. D., Levitan, C. A., Banks, M. S., & Schor, C. M. (2008). How does saccade adaptation affect visual perception? *Journal of Vision*, *8*(8), 1–16. doi: 10.1167/8.8.3.
- Herrnstein, R. J. (1961). Relative and absolute strength of response as a function of frequency of reinforcement. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, *4*(3), 267.
- Hochberg, J. E. (1950). Figure-ground reversal as a function of visual satiation. *Journal of Experimental Psychology*, *40*(5), 682–686. doi: 10.1037/h0060078.
- Hock, H. S., Kelso, J. A. S., & Schoner, G. (1993). Bistability and hysteresis in the organization of apparent motion patterns. *Journal of Experimental Psychology*, *19*, 63–80.

- Hock, H. S., Schöner, G., & Giese, M. (2003). The dynamical foundations of motion pattern formation: Stability, selective adaptation, and perceptual continuity. *Perception & Psychophysics*, *65*(3), 429 – 457. Retrieved February 7, 2011, .
- Hodges, W. F., & Fox, R. (1965). Effect of arousal and intelligence on binocular rivalry rate. *Perceptual and Motor Skills*, *20*, 71–75. Retrieved September 1, 2011, .
- Hohwy, J., Roepstorff, A., & Friston, K. (2008). Predictive coding explains binocular rivalry: An epistemological review. *Cognition*, *108*(3), 687–701. doi: 10.1016/j.cognition.2008.05.010.
- Holmes, D. J., Hancock, S., & Andrews, T. J. (2006). Independent binocular integration for form and colour. *Vision Research*, *46*(5), 665–677.
- Hong, S. W., & Blake, R. (2009). Interocular suppression differentially affects achromatic and chromatic mechanisms. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *71*(2), 403.
- Hong, S. W., & Shevell, S. K. (2006). Resolution of binocular rivalry: Perceptual misbinding of color. *Visual Neuroscience*, *23*(3-4), 561–566.
- Hong, S. W., & Shevell, S. K. (2008). Binocular rivalry between identical retinal stimuli with an induced color difference. *Visual Neuroscience*, *25*(03), 361–364.
- Hong, S. W., & Shevell, S. K. (2009). Color-Binding Errors During Rivalrous Suppression of Form. *Psychological Science*, *20*(9), 1084–1091. doi: 10.1111/j.1467-9280.2009.02408.x.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *The Journal of Physiology*, *160*(1), 106–154.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1964). Effects of monocular deprivation in kittens. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*, *248*(6), 492–497.
- Hupé, J. M., & Rubin, N. (2003). The dynamics of bi-stable alternation in ambiguous motion displays: a fresh look at plaids. *Vision Research*, *43*(5), 531–548.
- Hupé, J.-M., Joffo, L.-M., & Pressnitzer, D. (2008). Bistability for audiovisual stimuli: Perceptual decision is modality specific. *Journal of Vision*, *8*(7). doi: 10.1167/8.7.1.
- Hupé, J.-M., Lamirel, C., & Lorenceau, J. (2008). Pupil dilation does not predict subsequent stability in perceptual rivalry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *105*(28), E43. Retrieved February 11, 2009, .
- Ishimura, G. (1995). Visuomotor factors for action capture. *Investigate Ophthalmology and Visual Science (Supplement)*, *36*.
- Ishimura, G., & Shimojo, S. (1994). Voluntary action captures visual motion. *Investigative Ophthalmology and Visual Science (Suppl.)*, *35*, 1275.
- James, W. (1891). *The principles of psychology*. London: MacMillan.

- Jiang, Y., & Chun, M. M. (2001). Selective attention modulates implicit learning. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 54(4), 1105–1124.
- Jiang, Y., Costello, P., & He, S. (2007). Processing of invisible stimuli: Advantage of upright faces and recognizable words in overcoming interocular suppression. *Psychological Science*, 18(4), 349–355.
- Jimenez, L., & Mendez, C. (1999). Which attention is needed for implicit sequence learning? *Journal of Experimental Psychology: Learning, memory, and cognition*, 25(1), 236–259.
- Johnson, E. N., Hawken, M. J., & Shapley, R. (2001). The spatial transformation of color in the primary visual cortex of the macaque monkey. *Nature Neuroscience*, 4(4), 409–416.
- Jones, P. D., & Holding, D. H. (1975). Extremely long-term persistence of the McCollough effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1(4), 323–327. doi: 10.1037/0096-1523.1.4.323.
- Jonikaitis, D., Paepper, M., & Deubel, H. (2011). Saccades redistribute attentional resources. *Journal of Vision*, [abstract], in press.
- Julesz, B. (1971). Foundations of cyclopean perception. *Chicago: University of Chicago*.
- Julesz, B., & Miller, J. E. (1975). Independent spatial-frequency-tuned channels in binocular fusion and rivalry. *Perception*.
- Julesz, B., & Tyler, C. W. (1976). Neuronropy, an entropy-like measure of neural correlation, in binocular fusion and rivalry. *Biological Cybernetics*, 23(1), 25–32.
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1972). Subjective probability: A judgment of representative ness. *Cognitive Psychology*, 3(3), 430–454.
- Kalarickal, G. J., & Marshall, J. A. (2000). Neural model of temporal and stochastic properties of binocular rivalry. *Neurocomputing*, 32, 843–853.
- Kalisvaart, J. P., Rampersad, S. M., & Goossens, J. (2011). Binocular Onset Rivalry at the Time of Saccades and Stimulus Jumps. *PLoS ONE*, 6(6), e20017. doi: 10.1371/journal.pone.0020017.
- Kamin, L. J. (1968). "Attention-like" processes in classical conditioning. *Miami symposium on the prediction of behavior: Aversive stimulation* (pp. 9–31).
- Kamphuisen, A. P., van Wezel, R. J. A., & van Ee, R. (2007). Inter-ocular transfer of stimulus cueing in dominance selection at the onset of binocular rivalry. *Vision Research*, 47(9), 1142–1144.
- Kanai, R., Tsuchiya, N., & Verstraten, F. A. . (2006). The scope and limits of top-down attention in unconscious visual processing. *Current Biology*, 16(23), 2332–2336.
- Kanai, R., & Verstraten, F. A. . (2005). Perceptual manifestations of fast neural plasticity: Motion priming, rapid motion aftereffect and perceptual sensitization. *Vision Research*, 45(25-26), 3109–3116.
- Kang, M.-S. (2009). Size matters: A study of binocular rivalry dynamics. *Journal of Vision*, 9(1), 1–11.

- Kang, M.-S., & Blake, R. (2010). What causes alternations in dominance during binocular rivalry? *Attention, Perception, & Psychophysics*, *72*(1), 179–186. doi: 10.3758/APP.72.1.179.
- Kaufman, J. H., May, J. G., & Kunen, S. (1981). Interocular transfer of orientation-contingent color aftereffects with external and internal adaptation. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *30*(6), 547–551.
- Kaufman, L. (1964). Suppression and fusion in viewing complex stereograms. *The American Journal of Psychology*, *77*(2), 193–205.
- Kawamoto, A. H., & Anderson, J. A. (1985). A neural network model of multistable perception. *Acta Psychologica*, *59*(1), 35–65.
- Keren, G., & Lewis, C. (1994). The two fallacies of gamblers: Type I and Type II. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, *60*, 75–75.
- Kersten, D., Mamassian, P., & Yuille, A. (2004). Object Perception as Bayesian Inference. *Annual Review of Psychology*, *55*(1), 271–304.
- Kesten, H. (1958). Accelerated stochastic approximation. *The Annals of Mathematical Statistics*, *29*, 41–59.
- Kim, J., & Wilson, H. R. (1997). Motion Integration over Space: Interaction of the Center and Surround Motion. *Vision Research*, *37*(8), 991–1005.
- Kisvarday, Z. F., Toth, E., Rausch, M., & Eysel, U. T. (1997). Orientation-specific relationship between populations of excitatory and inhibitory lateral connections in the visual cortex of the cat. *Cerebral Cortex*, *7*(7), 605–618.
- Kitaoka, A., & Ishihara, M. (2000). Three Elemental Illusions Determine the Zollner Illusion. *Perception and Psychophysics*, *62*(3), 569–575.
- Kleinschmidt, A., Büchel, C., Zeki, S., & Frackowiak, R. S. J. (1998). Human brain activity during spontaneously reversing perception of ambiguous figures. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, *265*(1413), 2427.
- Klink, P. C., van Ee, R., Nijs, M. M., Brouwer, G. J., Noest, A. J., & van Wezel, R. J. A. (2008). Early interactions between neuronal adaptation and voluntary control determine perceptual choices in bistable vision. *Journal of Vision*, *8*(5), 16.
- Klink, P. C., van Ee, R., & van Wezel, R. J. A. (2008). General Validity of Levelt's Propositions Reveals Common Computational Mechanisms for Visual Rivalry. *PLoS ONE*, *3*(10), e3473. doi: 10.1371/journal.pone.0003473.
- Knapen, T., Kanai, R., Brascamp, J., van Boxtel, J., & van Ee, R. (2007). Distance in feature space determines exclusivity in visual rivalry. *Vision Research*, *47*(26), 3269–3275. doi: 10.1016/j.visres.2007.09.005.

- Koene, A. R. (2006). A Model for Perceptual Averaging and Stochastic Bistable Behavior and the Role of Voluntary Control. *Neural Computation*, *18*(12), 3069–3096. doi: 10.1162/neco.2006.18.12.3069
- Köhler, W., & Wallach, H. (1944). Figural After-Effects. An Investigation of Visual Processes. *Proceedings of the American Philosophical Society*, *88*(4), 269–357. Retrieved February 13, 2011, .
- Kohn, A. (2007). Visual adaptation: Physiology, mechanisms, and functional benefits. *Journal of Neurophysiology*, *97*(5), 3155–3164. doi: 10.1152/jn.00086.2007.
- Kohn, A., & Movshon, J. A. (2003). Neuronal Adaptation to Visual Motion in Area MT of the Macaque. *Neuron*, *39*(4), 681–691. doi: 10.1016/S0896-6273(03)00438-0.
- Kovacs, I., Papathomas, T. V., Yang, M., & Feher, A. (1996). When the brain changes its mind: Interocular grouping during binocular rivalry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *93*(26), 15508–15511.
- Kristjánsson, A. (2006). Simultaneous priming along multiple feature dimensions in a visual search task. *Vision Research*, *46*(16), 2554–2570. doi: 10.1016/j.visres.2006.01.015.
- Kristjánsson, Á., Mackeben, M., & Nakayama, K. (2001). Rapid, object-based learning in the deployment of transient attention. *Perception*, *30*(11), 1375–1388.
- Kristjánsson, Á., & Nakayama, K. (2003). A primitive memory system for the deployment of transient attention. *Perception and Psychophysics*, *65*(5), 711–724.
- Kubovy, M. (1994). The perceptual organization of dot lattices. *Psychonomic Bulletin & Review*, *1*(2), 182–190.
- Lack, L. C. (1971). The role of accommodation in the control of binocular rivalry. *Perception & Psychophysics*, *10*, 38–42.
- Lack, L. C. (1974). Selective attention and the control of binocular rivalry. *Perception & Psychophysics*, *15*(1), 193–200. doi: 10.3758/BF03205846.
- Lack, L. C. (1978). *Selective attention and the control of binocular rivalry*. Mouton.
- Laing, C. R., & Chow, C. C. (2002). A spiking neuron model for binocular rivalry. *Journal of computational neuroscience*, *12*(1), 39–53.
- Lalanne, C. (2006). *Formes et mouvements: de la perception à l'action*. Université Pierre et Marie Curie, .
- Lambert, A., Naikar, N., McLachlan, K., & Aitken, V. (1999). A new component of visual orienting: Implicit effects of peripheral information and subthreshold cues on covert attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *25*, 321–340.
- Lamirel, C., Hupé, J.-M., & Lorenceau, J. (2008). Pupil dynamics during bistable form/motion binding. *Journal of Vision*, *8*(6), 253–253.

- Lamme, V. A. ., & Roelfsema, P. R. (2000). The distinct modes of vision offered by feedforward and recurrent processing. *Trends in Neurosciences*, 23(11), 571–579.
- Lankheet, M. J. . (2006). Unraveling adaptation and mutual inhibition in perceptual rivalry. *Journal of Vision*, 6(4).
- Lee, S. H., & Blake, R. (1999). Rival ideas about binocular rivalry. *Vision Research*, 39(8), 1447–1454.
- Lee, S. H., Blake, R., & Heeger, D. J. (2005). Travelling waves of activity in primary visual cortex during binocular rivalry. *Nature neuroscience*, 8(1), 22.
- Lee, S. H., Blake, R., & Heeger, D. J. (2007). Hierarchy of cortical responses underlying binocular rivalry. *Nature Neuroscience*, 10(8), 1048–54.
- Lee, S.-H., & Blake, R. (2004). A fresh look at interocular grouping during binocular rivalry. *Vision Research*, 44(10), 983–991. doi: 10.1016/j.visres.2003.12.007.
- Lehky, S. R. (1988). An astable multivibrator model of binocular rivalry. *Perception*, 17(2), 215 – 228. doi: 10.1068/p170215.
- Lehky, S. R. (1995). Binocular rivalry is not chaotic. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 259(1354), 71–76.
- Lehky, S. R., & Maunsell, J. H. . (1996). No binocular rivalry in the LGN of alert macaque monkeys. *Vision Research*, 36(9), 1225–1234.
- Lehmkuhle, S. W., & Fox, R. (1975). Effect of binocular rivalry suppression on the motion aftereffect. *Vision Research*, 15(7), 855–859. doi: DOI: 10.1016/0042-6989(75)90266-7.
- Leopold, D. A., & Logothetis, N. K. (1996). Activity changes in early visual cortex reflect monkeys' percepts during binocular rivalry. *Nature*, 379(6565), 549–553.
- Leopold, D. A., & Logothetis, N. K. (1999). Multistable phenomena: changing views in perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 3(7), 254–264.
- Leopold, D. A., Maier, A., Wilke, M., & Logothetis, N. K. (2005). Binocular rivalry and the illusion of monocular vision. In D. Alais & R. Blake (Eds.), *Binocular rivalry* (pp. 231–258). Cambridge, MA: MIT Press.
- Leopold, D. A., O'Toole, A. J., Vetter, T., & Blanz, V. (2001). Prototype-referenced shape encoding revealed by high-level aftereffects. *Nature Neuroscience*, 4(1), 89–94.
- Leopold, D. A., Wilke, M., Maier, A., & Logothetis, N. K. (2002). Stable perception of visually ambiguous patterns. *Nature Neuroscience*, 5(6), 605–609.
- Levelt, W. J. (1965). Binocular brightness averaging and contour information. *British Journal of Psychology*, 56, 1–13.
- Levelt, W. J. (1966). The alternation process in binocular rivalry. *British Journal of Psychology*, 57(3), 225–238.

- Levelt, W. J. (1967). Note on the distribution of dominance times in binocular rivalry. *British Journal of Psychology*, 58(1), 143–145.
- Levi, D. M. (2005). Perceptual learning in adults with amblyopia: A reevaluation of critical periods in human vision. *Developmental psychobiology*, 46(3), 222–232.
- Levin, D. T., & Simons, D. J. (1997). Failure to detect changes to attended objects in motion pictures. *Psychonomic Bulletin & Review*, 4(4), 501–506.
- Li, C. Y., & Guo, K. (1995). Measurements of geometric illusions, illusory contours and stereo-depth at luminance and colour contrast. *Vision Research*, 35(12), 1713–1720. Retrieved March 18, 2010, .
- van Lier, R., Vergeer, M., & Anstis, S. (2009). Filling-in afterimage colors between the lines. *Current Biology*, 19(8), R323–R324.
- Logothetis, N. K., Leopold, D. A., & Sheinberg, D. L. (1996). What is rivalling during binocular rivalry? *Nature*, 380(6575), 621–624.
- Logothetis, N. K., & Schall, J. D. (1990). Binocular motion rivalry in macaque monkeys: eye dominance and tracking eye movements. *Vision Research*, 30(10), 1409–1419.
- Logothetis, N., & Schall, J. (1989). Neuronal correlates of subjective visual perception. *Science*, 245(4919), 761–763. doi: 10.1126/science.2772635.
- Long, G. M., & Olszweski, A. D. (1999). To reverse or not to reverse: When is an ambiguous figure not ambiguous? *The American Journal of Psychology*, 112(1), 41–71.
- Long, G. M., & Toppino, T. C. (1994). A new twist on the rotating-trapezoid illusion: evidence for neural-adaptation effects. *Perception*, 23(6), 619 – 634. doi: 10.1068/p230619.
- Lorber, M., Zuber, B. L., & Stark, L. (1965). Suppression of the pupillary light reflex in binocular rivalry and saccadic suppression. *Nature*, 208, 558–560.
- Lorenceanu, J., Gimenez-Sastre, B., & Lalanne, C. (2003). Hysteresis in perceptual binding. *Perception*, 32(ECVP Abstract Supplement).
- Lorenceanu, J., & Shiffrar, M. (1992). The Influence of Terminators on Motion Integration Across Space. *Vision Research*, 32(2), 263–273.
- Lowe, S. W., & Ogle, K. N. (1966). Dynamics of the pupil during binocular rivalry. *Archives of Ophthalmology*, 75(3), 395–403.
- Lu, Z.-L., & Sperling, G. (1995). The functional architecture of human visual motion perception. *Vision Research*, 35(19), 2697–2722. doi: 10.1016/0042-6989(95)00025-U.
- Lumer, E. D. (1998). A neural model of binocular integration and rivalry based on the coordination of action-potential timing in primary visual cortex. *Cerebral Cortex*, 8(6), 553.
- Lumer, E. D., Friston, K. J., & Rees, G. (1998). Neural Correlates of Perceptual Rivalry in the Human Brain. *Science*, 280(5371), 1930.

- Lumer, E. D., & Rees, G. (1999). Covariation of activity in visual and prefrontal cortex associated with subjective visual perception. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(4), 1669.
- Mack, A., & Rock, I. (1998). *Inattention blindness*. MIT Press Cambridge, Mass.
- Maffei, L., Fiorentini, A., & Bisti, S. (1973). Neural correlate of perceptual adaptation to gratings. *Science*, 182, 1036–1038.
- Maier, A., Wilke, M., Logothetis, N. K., & Leopold, D. A. (2003). Perception of temporally interleaved ambiguous patterns. *Current Biology*, 13(13), 1076–1085.
- Maljkovic, V., & Nakayama, K. (1994). Priming of pop-out: I. Role of features. *Memory and Cognition*, 22(6), 657–72.
- Maljkovic, V., & Nakayama, K. (1996). Priming of pop-out: II. The role of position. *Perception & Psychophysics*, 58(7), 977–991.
- Maljkovic, V., & Nakayama, K. (2000). Priming of pop-out: III. A short term implicit memory system beneficial for rapid target selection. *Visual Cognition*, 7, 571–595.
- Maloney, L. T., Martello, M. F. D., Sahm, C., & Spillmann, L. (2005). Past trials influence perception of ambiguous motion quartets through pattern completion. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(8), 3164–3169.
- Mamassian, P., & Goutcher, R. (2005). Temporal dynamics in bistable perception. *Journal of Vision*, 5(4), 361–375.
- Mamassian, P., & Landy, M. S. (1998). Observer biases in the 3D interpretation of line drawings. *Vision Research*, 38(18), 2817–2832.
- Mamassian, P., Landy, M. S., & Maloney, L. T. (2002). Bayesian Modelling of Visual Perception. In R. Rao, B. Olshausen, & M. Lewicki (Eds.), *Probabilistic Models of the Brain: Perception and Neural Function* (pp. 13–36). Cambridge, MA: MIT Press.
- Mamassian, P., & Wallace, J. M. (2010). Sustained directional biases in motion transparency. *Journal of Vision*, 10(13), 1–12. doi: 10.1167/10.13.23.
- de Marco, A., Penengo, P., Trabucco, A., Borsellino, A., Carlini, F., Piani, M., et al. (1977). Stochastic models and fluctuations in reversal time of ambiguous figures. *Perception*, 6(6), 645 – 656. doi: 10.1068/p060645.
- Marr, D. (1982). *Vision: A computational approach*. Freeman & Co., San Francisco.
- Marshak, W., & Sekuler, R. (1979). Mutual repulsion between moving visual targets. *Science*, 205(4413), 1399–1401.
- Martínez Rach, M. O., Martínez Verdú, F. M., Grzywacz, N. M., & Balboa, R. M. (2005). Distribution of velocities in movies from natural human settings. *Journal of Vision*, 5(8), 606. doi: 10.1167/5.8.606.

- Maruya, K., Watanabe, H., & Watanabe, M. (2008). Adaptation to invisible motion results in low-level but not high-level aftereffects. *Journal of Vision*, *8*(11).
- Maruya, K., Yang, E., & Blake, R. (2007). Voluntary action influences visual competition. *Psychological Science*, *18*(12), 1090.
- Masson, M. E. J., & Loftus, G. R. (2003). Using Confidence Intervals for Graphically Based Data Interpretation. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, *57*(3), 203–220.
- Mather, G. (1980). The movement aftereffect and a distribution-shift model for coding the direction of visual movement. *Perception*, *9*(4), 379–392.
- Mather, G., Verstraten, F., & Anstis, S. M. (1998). *The motion aftereffect: A modern perspective*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Matsuoka, K. (1984). The dynamic model of binocular rivalry. *Biological Cybernetics*, *49*(3), 201–208.
- McColl, S. L., & Mitchell, D. E. (1998). Stereodeficient subjects show substantial differences in interocular transfer of two motion adaptation aftereffects. *Vision Research*, *38*(12), 1889–1900. Retrieved November 19, 2010, .
- McCollough, C. (1965). Color Adaptation of Edge-Detectors in the Human Visual System. *Science*, *149*(3688), 1115–1116. doi: 10.1126/science.149.3688.1115.
- McConkie, G. W., & Zola, D. (1979). Is visual information integrated across successive fixations in reading? *Perception & Psychophysics*, *25*(3), 221–224. doi: 10.3758/BF03202990.
- McCormick, D. A., & Williamson, A. (1989). Convergence and divergence of neurotransmitter action in human cerebral cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *86*(20), 8098.
- McKone, E., Edwards, M., Robbins, R., & Anderson, R. (2005). The stickiness of face adaptation aftereffects. *Journal of Vision*, *5*(8), 822. doi: 10.1167/5.8.822.
- Meenes, M. (1930). A phenomenological description of retinal rivalry. *The American Journal of Psychology*, *42*(2), 260–269.
- Meng, M., & Tong, F. (2004). Can attention selectively bias bistable perception? Differences between binocular rivalry and ambiguous figures. *Journal of Vision*, *4*(7), 539–551. doi: 10.1167/4.7.2.
- Merk, I., & Schnakenberg, J. (2002). A stochastic model of multistable visual perception. *Biological Cybernetics*, *86*(2), 111–116.
- Miller, S. M., Liu, G. B., Ngo, T. T., Hooper, G., Riek, S., Carson, R. G., et al. (2000). Interhemispheric switching mediates perceptual rivalry. *Current Biology*, *10*(7), 383–392.
- Mitchell, D. E., & Ware, C. (1974). Interocular transfer of a visual after-effect in normal and stereoblind humans. *The Journal of Physiology*, *236*(3), 707.
- Mitchell, J. F., Stoner, G. R., & Reynolds, J. H. (2004). Object-based attention determines dominance in binocular rivalry. *Nature*, *429*(6990), 410–413.

- Mitroff, S. R., Sobel, D. M., & Gopnik, A. (2006). Reversing how to think about ambiguous figure reversals: Spontaneous alternating by uninformed observers. *Perception, 35*(5), 709 – 715. doi: 10.1068/p5520.
- Moidell, B. G., & Bedell, H. E. (1988). Changes in oculocentric visual direction induced by the recalibration of saccades. *Vision Research, 28*(2), 329–336.
- Mollon, J. D. (1974). After-effects and the brain. *New Scientist, 61*, 479–482.
- Mollon, J. D. (1977). Neural analysis. In K. von Fieandt & I. K. Moustgaard (Eds.), *The perceptual world*. London: Academic Press.
- Moore, M. (1966). Aggression themes in a binocular rivalry situation. *Journal of Personality and Social Psychology, 3*(6), 685.
- Moradi, F., Koch, C., & Shimojo, S. (2005). Face adaptation depends on seeing the face. *Neuron, 45*(1), 169–175.
- Moreno-Bote, R., Rinzel, J., & Rubin, N. (2007). Noise-Induced Alternations in an Attractor Network Model of Perceptual Bistability. *Journal of Neurophysiology, 98*(3), 1125 –1139. doi: 10.1152/jn.00116.2007.
- Moreno-Bote, R., Shpiro, A., Rinzel, J., & Rubin, N. (2010). Alternation rate in perceptual bistability is maximal at and symmetric around equi-dominance. *Journal of Vision, 10*(11).
- Morinaga, S. (1933). A study of the Zöllner illusion. *Japanese Journal of Psychology, 8*, 195–242.
- Movshon, J. A., Chambers, B. E. I., & Blakemore, C. (1972). Interocular transfer in normal humans and those who lack stereopsis. *Perception, 1*(4), 483–490.
- Movshon, J. A., & Lennie, P. (1979). Pattern-selective adaptation in visual cortical neurones. *Nature, 278*(5707), 850–852. doi: 10.1038/278850a0.
- Mueller, T., & Blake, R. (1989). A fresh look at the temporal dynamics of binocular rivalry. *Biological cybernetics, 61*(3), 223–232.
- Mueller, T. J. (1990). A physiological model of binocular rivalry. *Visual Neuroscience, 4*(01), 63–73.
- Murata, T., Matsui, N., Miyauchi, S., Kakita, Y., & Yanagida, T. (2003). Discrete stochastic process underlying perceptual rivalry. *Neuroreport, 14*(10), 1347.
- Nakayama, K., & Mackeben, M. (1989). Sustained and transient components of focal visual attention. *Vision Research, 29*(11), 1631–1647.
- Nakayama, K., & Shimojo, S. (1990). Da Vinci stereopsis: depth and subjective occluding contours from unpaired image points. *Vision Research, 30*(11), 1811–1825.
- Nawrot, M., & Blake, R. (1991). The interplay between stereopsis and structure from motion. *Perception & Psychophysics, 49*(3), 230–244. Retrieved December 17, 2010, .

- Necker, L. A. (1832). Observations on some remarkable optical phenomena seen in Switzerland; and on an optical phenomenon which occurs on viewing a figure of a crystal or geometrical solid. *London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1, 329–337.
- Neitz, J., Carroll, J., Yamauchi, Y., Neitz, M., & Williams, D. R. (2002). Color perception is mediated by a plastic neural mechanism that is adjustable in adults. *Neuron*, 35(4), 783–792.
- Ngo, T. T., Miller, S. M., Liu, G. B., & Pettigrew, J. D. (2000). Binocular rivalry and perceptual coherence. *Current Biology*, 10(4), R134–R136.
- Nguyen, V. A., Freeman, A. W., & Wenderoth, P. (2001). The depth and selectivity of suppression in binocular rivalry. *Perception & Psychophysics*, 63(2), 348.
- Noest, A. J., Van Ee, R., Nijs, M. M., & Van Wezel, R. J. A. (2007). Percept-choice sequences driven by interrupted ambiguous stimuli: A low-level neural model. *Journal of Vision*, 7(8).
- Norman, H. F., Norman, J. F., & Bilotta, J. (2000). The temporal course of suppression during binocular rivalry. *Perception*, 29, 831–841.
- O Shea, R. P. (2003). Binocular rivalry in split-brain observers. *Journal of Vision*, 3(10), 610–615.
- O'Regan, J. K., Deubel, H., Clark, J. J., & Rensink, R. A. (2000). Picture Changes During Blinks: Looking Without Seeing and Seeing Without Looking. *Visual Cognition*, 7, 191–212.
- O'Regan, J. K., & Noë, A. (2002). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and brain sciences*, 24(05), 939–973.
- O'Regan, J. K., Rensink, R. A., & Clark, J. J. (1999). Change-blindness as a result of “mudsplashes.” *Nature*, 398(6722), 34.
- O'Shea, R. P. (1987). Chronometric analysis supports fusion rather than suppression theory of binocular vision. *Vision Research*, 27(5), 781–791. doi: 16/0042-6989(87)90075-7.
- O'Shea, R. P., & Blake, R. (1986). Dichoptic temporal frequency differences do not lead to binocular rivalry. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 39(1), 59–63.
- O'Shea, R. P., & Crassini, B. (1981). Interocular transfer of the motion after-effect is not reduced by binocular rivalry. *Vision Research*, 21(6), 801–804.
- O'Shea, R. P., Parker, A., La Rooy, D., & Alais, D. (2009). Monocular rivalry exhibits three hallmarks of binocular rivalry: Evidence for common processes. *Vision Research*, 49(7), 671–681.
- O'Toole, B., & Wenderoth, P. (1977). The tilt illusion: Repulsion and attraction effects in the oblique meridian. *Vision Research*, 17(3), 367–374. Retrieved April 26, 2011, .
- Ogle, K. N. (1946). The binocular depth contrast phenomenon. *The American Journal of Psychology*, 59(1), 111–126.
- Ogle, K. N. (1962). The optical space sense. In H. Davson (Ed.), *The Eye* (Academic Press, Inc., Vol. 4, pp. 288–290). New York.

- Ogle, K. N., & Wakefield, J. M. (1967). Stereoscopic depth and binocular rivalry. *Vision Research*, 7(1-2), 89–98. doi: 16/0042-6989(67)90029-6.
- Ohzawa, I., Sclar, G., & Freeman, R. D. (1982). Contrast gain control in the cat visual cortex. *Nature*, 298(5871), 266–268. doi: 10.1038/298266a0.
- Ohzawa, I., Sclar, G., & Freeman, R. D. (1985). Contrast gain control in the cat's visual system. *Journal of Neurophysiology*, 54(3), 651–667. Retrieved February 15, 2011, .
- Ooi, T. L., & He, Z. J. (1999). Binocular rivalry and visual awareness: the role of attention. *Perception*, 28(5), 551–574.
- Orbach, J., Ehrlich, D., & Heath, H. A. (1963). Reversibility of the necker cube: I. An examination of the concept of "satiation of orientation". *Perceptual and Motor Skills*.
- Ostrovsky, Y., Andalman, A., & Sinha, P. (2006). Vision following extended congenital blindness. *Psychological Science*, 17(12), 1009–1014. doi: 10.1111/j.1467-9280.2006.01827.x.
- Ostrovsky, Y., Meyers, E., Ganesh, S., Mathur, U., & Sinha, P. (2009). Visual parsing after recovery from blindness. *Psychological Science*, 20(12), 1484–1491. doi: 10.1111/j.1467-9280.2009.02471.x.
- Otterpohl, J. R., Haynes, J. D., Emmert-Streib, F., Vetter, G., & Pawelzik, K. (2000). Extracting the dynamics of perceptual switching from "noisy" behaviour: an application of hidden Markov modelling to pecking data from pigeons. *Journal of Physiology, Paris*, 94(5-6), 555–567. Retrieved March 25, 2010, .
- Over, R., Broerse, J., & Crassini, B. (1972). Orientation illusion and masking in central and peripheral vision. *Journal of Experimental Psychology*, 96(1), 25.
- Oyama, T. (1975). Determinants of the Zollner illusion. *Psychological Research*, 37(3), 261–280. doi: 10.1007/BF00309038.
- Paffen, C. L. E., Alais, D., & Verstraten, F. A. J. (2006). Attention Speeds Binocular Rivalry. *Psychological Science*, 17(9), 752–756.
- Pashler, H. (1988). Familiarity and visual change detection. *Perception & Psychophysics*, 44(4), 369–378.
- Pastukhov, A., & Braun, J. (2007). Perceptual reversals need no prompting by attention. *Journal of Vision*, 7(10), 5.
- Pearson, J., & Brascamp, J. (2008). Sensory memory for ambiguous vision. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(9), 334–341.
- Pearson, J., & Clifford, C. W. . (2004). Determinants of visual awareness following interruptions during rivalry. *Journal of Vision*, 4(3).
- Pearson, J., Tadin, D., & Blake, R. (2007). The effects of transcranial magnetic stimulation on visual rivalry. *Journal of Vision*, 7(7). doi: 10.1167/7.7.2.
- Péllisson, D., Alahyane, N., Panouillères, M., & Tilikete, C. (2009). Sensorimotor adaptation of saccadic eye movements. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*. doi: 10.1016/j.neubiorev.2009.12.010.

- Pelli, D. G. (1997). The VideoToolbox software for visual psychophysics: transforming numbers into movies. *Spatial Vision, 10*(4), 437–442.
- Pettigrew, J. D. (2001). Searching for the Switch: Neural Bases for Perceptual Rivalry Alternations. *Brain and Mind, 2*(1), 85–118.
- Pettigrew, J. D., & Miller, S. M. (1998). A “sticky” interhemispheric switch in bipolar disorder? *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 265*(1411), 2141.
- Piccolino, M., & Wade, N. J. (2006). Flagging early examples of ambiguity I. *Perception, 35*(7), 861.
- Pinna, B., Brelstaff, G., & Spillmann, L. (2001). Surface color from boundaries: a new “watercolor” illusion. *Vision Research, 41*(20), 2669–2676.
- Porta, J. B. (1593). *De refractione. Optices Parte: Libri Novem*. Naples: Carlinum and Pacem.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 32*(1), 3–25.
- Posner, M. I., & Patterson, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience, 13*, 25–42.
- Pressnitzer, D., & Hupé, J. M. (2005). Is auditory streaming a bistable percept? *Proceedings of Forum Acusticum, Budapest, 1557–1561*.
- Pressnitzer, D., & Hupé, J. M. (2006). Temporal Dynamics of Auditory and Visual Bistability Reveal Common Principles of Perceptual Organization. *Current Biology, 16*(13), 1351–1357.
- Ramachandran, V. S. (1991). Form, motion, and binocular rivalry. *Science, 251*(4996), 950.
- Ramachandran, V. S., & Anstis, S. M. (1985). Perceptual organization in multistable apparent motion. *Perception, 14*(2), 135–143.
- Ramachandran, V. S., & Anstis, S. M. (1986). The perception of apparent motion. *Scientific American, 254*(6), 102–109.
- Ramachandran, V. S., Rao, V. M., & Vidyasagar, T. R. (1973). The role of contours in stereopsis.
- Ramachandran, V. S., & Sriram, S. (1972). Stereopsis generated with Julesz patterns in spite of rivalry imposed by colour filters. *Nature, 237*(5354), 347.
- Rao, V. M. (1977). Tilt illusion during binocular rivalry. *Vision Research, 17*(2), 327–328. Retrieved March 18, 2010, .
- Reeves, A., & Sperling, G. (1986). Attention gating in short-term visual memory. *Psychological Review, 93*(2), 180.
- Rensink. (2002a). Failure to see more than one change at a time. *Journal of Vision, 2*(7), 245–245.
- Rensink, R. A. (2002b). Change Detection. *Annual Reviews in Psychology, 53*(1), 245–277.
- Rensink, R. A., O’Regan, J. K., & Clark, J. J. (1997). The Need for Attention to Perceive Changes in Scenes. *Psychological Science, 8*(5), 368–373.

- Rensink, R. A., O'Regan, J. K., & Clark, J. J. (2000). On the failure to detect changes in scenes across brief interruptions. *Change Blindness and Visual Memory*, 7(1/2/3), 127–145.
- Rescorla, R. A. (1968). Probability of shock in the presence and absence of CS in fear conditioning. *Journal of comparative and physiological psychology*, 66(1), 1.
- Rescorla, R. A. (1988). Pavlovian conditioning: It's not what you think it is. *American Psychologist*, 43(3), 151.
- Richards, W. (1966). Attenuation of the pupil response during binocular rivalry. *Vision Research*, 6(3), 239–240. Retrieved June 2, 2011, .
- Richards, W. (1970). Stereopsis and stereoblindness. *Experimental Brain Research*, 10(4), 380–388.
- Rock, I., Gopnik, A., & Hall, S. (1994). Do young children reverse ambiguous figures? *Perception*, 23, 635–635.
- Rock, I., Hall, S., & Davis, J. (1994). Why do ambiguous figures reverse? *Acta Psychologica*, 87(1), 33–59. doi: 16/0001-6918(94)90065-5.
- Rock, I., Linnett, C. M., Grant, P., & Mack, A. (1992). Perception without attention: results of a new method. *Cognitive Psychology*, 24(4), 502–34.
- Rock, I., & Mitchener, K. (1992). Further evidence of failure of reversal of ambiguous figures by uninformed subjects. *Perception*, 21(1), 39–45.
- Rubin, E. (1915). Synoplevde Figurer [Visual figures]. *Kopenhagen: Gyldendalske*.
- Rubin, E. (1921). *Visuell wahrgenommene figuren: Studien in psychologischer analyse*. Gyldendalske boghandel.
- Rubin, N., & Hupé, J. M. (2005). Binocular Rivalry. In D. Alais & R. Blake (Eds.), *Dynamics of perceptual bistability: plaids and binocular rivalry compared* (pp. 137–154). Cambridge, MA: MIT Press.
- von Schiller, P. (1933). Stroboskopische alternativversuche. *Psychological Research*, 17(1), 179–214.
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing: 1. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84(1), 1–66.
- Scholl, B. J. (2001). Objects and attention: The state of the art. *Cognition*, 80(1-2), 1–46.
- Schrater, P. R., & Simoncelli, E. P. (1998). Local velocity representation: evidence from motion adaptation. *Vision Research*, 38(24), 3899–3912. doi: 10.1016/S0042-6989(98)00088-1.
- Schröder, H. (1858). Über eine optische Inversion bei Betrachtung verkehrter, durch optische Vorrichtung entworfener physischer Bilder *Annalen der Physik und Chemie*, 181, S. 298-311 - Google Scholar. *Annalen der Physik und Chemie*, 181(S.), 298–311. Retrieved August 14, 2011, .
- Schultz, W. (2000). Multiple reward signals in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 1(3), 199–208.
- Schyns, P. G., & Oliva, A. (1999). Dr. Angry and Mr. Smile: when categorization flexibly modifies the perception of faces in rapid visual presentations. *Cognition*, 69(3), 243–265.

- Seitz, A., Lefebvre, C., Watanabe, T., & Jolicoeur, P. (2005). Requirement for high-level processing in subliminal learning. *Current Biology*, *43*, 134–161.
- Seitz, A. R., Kim, D., & Watanabe, T. (2009). Rewards evoke learning of unconsciously processed visual stimuli in adult humans. *Neuron*, *61*(5), 700–707.
- Seitz, A. R., Nanez, J. E., Holloway, S. R., Koyama, S., & Watanabe, T. (2005). Seeing what is not there shows the costs of perceptual learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *102*(25), 9080.
- Seitz, A. R., Nanez, J. E., Holloway, S., Tsushima, Y., & Watanabe, T. (2006). Two cases requiring external reinforcement in perceptual learning. *Journal of Vision*, *6*(9), 966–973. doi: 10.1167/6.9.9.
- Seitz, A. R., & Watanabe, T. (2003). Is subliminal learning really passive. *Nature*, *422*(6927), 36.
- Seitz, A., & Watanabe, T. (2005). A unified model for perceptual learning. *Trends in Cognitive Sciences*, *9*(7), 329–334.
- Shadlen, M., & Carney, T. (1986). Mechanisms of human motion perception revealed by a new cyclopean illusion. *Science*, *232*(4746), 95–97.
- Sheinberg, D. L., & Logothetis, N. K. (1997). The role of temporal cortical areas in perceptual organization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *94*(7), 3408.
- Sheppard, B. M., & Pettigrew, J. D. (2006). Plaid motion rivalry: Correlates with binocular rivalry and positive mood state. *Perception*, *35*(2), 157–169. doi: 10.1068/p5395.
- Sherrington, C. (1906). *The integrative action of the nervous system*. New Haven, Conn.: Yale University Press.
- Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychological Review*, *84*(2), 127–190.
- Shimojo, S., & Nakayama, K. (1990). Real world occlusion constraints and binocular rivalry. *Vision Research*, *30*(1), 69–80.
- Shimojo, S., & Nakayama, K. (1994). Interocularly unpaired zones escape local binocular matching. *Vision research*, *34*(14), 1875–1881.
- Shin, K., Stolte, M., & Chong, S. C. (2009). The effect of spatial attention on invisible stimuli. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *71*(7), 1507–1513.
- Simons, D. J. (2000). Current Approaches to Change Blindness. *Visual Cognition*, *7*(1/2/3), 1–15.
- Simons, D. J., & Ambinder, M. S. (2005). Change blindness. *Current Directions in Psychological Science*, *14*(1), 44–48.
- Simons, D. J., & Chabris, C. F. (1999). Gorillas in our midst: sustained inattentive blindness for dynamic events. *Perception*, *28*, 1059–1074.

- Simons, D. J., Franconeri, S. L., & Reimer, R. L. (2000). Change blindness in the absence of a visual disruption. *Perception*, *29*(10), 1143–1154.
- Simons, D. J., & Levin, D. T. (1998). Failure to detect changes to people during a real-world interaction. *Psychonomic Bulletin & Review*, *5*(4), 644–649.
- Simons, D. J., & Rensink, R. A. (2005). Change blindness: past, present, and future. *Trends in Cognitive Sciences*, *9*(1), 16–20. doi: 10.1016/j.tics.2004.11.006.
- Sindermann, F., & Lüddecke, H. (1972). Monocular analogues to binocular contour rivalry. *Vision Research*, *12*(5), 763–772.
- Sinha, P., & Adelson, E. (1993). Recovering reflectance and illumination in a world of painted polyhedra. *Computer Vision, 1993. Proceedings., Fourth International Conference on* (pp. 156–163).
- Smith, E., Levi, D., Harwerth, R., & White, J. (1982). Color vision is altered during the suppression phase of binocular rivalry. *Science*, *218*(4574), 802–804. doi: 10.1126/science.7134975.
- Sobel, K., & Blake, R. (2002a). Subjective contours and binocular rivalry. *Journal of Vision*, *2*(7), 460.
- Sobel, K. V., & Blake, R. (2002b). How context influences predominance during binocular rivalry. *Perception*, *31*(7), 813–824.
- Spitz, H. H., & Lipman, R. S. (1962). Some factors affecting Necker cube reversal rate. *Perceptual and Motor Skills*.
- Squires, P. C. (1956). Stereopsis produced without horizontally disparate stimulus loci. *Journal of Experimental Psychology*, *52*(3), 199–203.
- Srinivasan, R., Russell, D. P., Edelman, G. M., & Tononi, G. (1999). Increased Synchronization of Neuromagnetic Responses during Conscious Perception. *Journal of Neuroscience*, *19*(13), 5435.
- Sterzer, P., Russ, M. O., Preibisch, C., & Kleinschmidt, A. (2002). Neural correlates of spontaneous direction reversals in ambiguous apparent visual motion. *Neuroimage*, *15*(4), 908–916.
- Stocker, A. A., & Simoncelli, E. P. (2006a). Noise characteristics and prior expectations in human visual speed perception. *Nature Neuroscience*, *9*(4), 578–585. doi: 10.1038/nn1669.
- Stocker, A., & Simoncelli, E. (2006b). Sensory adaptation within a Bayesian framework for perception. *Advances in Neural Information Processing Systems*, *18*, 1289.
- Stollenwerk, L., & Bode, M. (2003). Lateral Neural Model of Binocular Rivalry. *Neural Computation*, *15*(12), 2863–2882. doi: 10.1162/089976603322518777
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology: General*, *121*(1), 15.
- Struber, D., Basar-Eroglu, C., Hoff, E., & Stadler, M. (2000). Reversal-rate dependent differences in the EEG gamma-band during multistable visual perception. *International Journal of Psychophysiology*, *38*(3), 243–252.

- Su, Y., He, Z. J., & Ooi, T. L. (2009). Coexistence of binocular integration and suppression determined by surface border information. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *106*(37), 15990.
- Sundali, J., & Croson, R. (2006). Biases in casino betting: The hot hand and the gambler's fallacy. *Judgment and Decision Making*, *1*(1), 1-12.
- Sundareswara, R., & Schrater, P. R. (2008). Perceptual multistability predicted by search model for Bayesian decisions. *Journal of Vision*, *8*(5), 12. doi: 10.1167/8.5.12.
- Sutherland, N. S. (1961). Figural after-effects and apparent size. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *13*(4), 222-228.
- Suzuki, S., & Grabowecky, M. (2002). Evidence for Perceptual "Trapping" and Adaptation in Multistable Binocular Rivalry. *Neuron*, *36*(1), 143-157.
- Tam, W. J., & Stelmach, L. B. (1998). Display duration and stereoscopic depth discrimination. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, *52*(1), 56.
- Taylor, M. M. (1962). The distance paradox of the figural after-effect in auditory localization. *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie*, *16*(4), 278-282. doi: 10.1037/h0083254.
- Taylor, M. M. (1971). Contrast reversal or distance paradox in the temperature perception aftereffect? *Perception & Psychophysics*, *10*(4), 247-248. doi: 10.3758/BF03212814.
- Taylor, M. M., & Aldridge, K. D. (1974). Stochastic processes in reversing figure perception. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *16*(1), 9-25.
- Terrell, D. (1994). A test of the gambler's fallacy: Evidence from pari-mutuel games. *Journal of Risk and Uncertainty*, *8*(3), 309-317. doi: 10.1007/BF01064047.
- Thompson, P. (1976). *Velocity Aftereffects and the Perception of Movement: Ph.D Thesis*. Cambridge, UK: University of Cambridge.
- Thompson, P. (1981). Velocity after-effects: the effects of adaptation to moving stimuli on the perception of subsequently seen moving stimuli. *Vision Research*, *21*(3), 337-345.
- Thompson, P., & Burr, D. (2009). Visual aftereffects. *Current Biology*, *19*(1), R11-14. doi: 10.1016/j.cub.2008.10.014.
- Thompson, P., & Wright, J. (1994). The role of intervening patterns in the storage of the movement aftereffect. *Perception*, *23*, 1233-1233.
- Tong, F., & Engel, S. A. (2001). Interocular rivalry revealed in the human cortical blind-spot representation. *Nature*, *411*(6834), 195-9.
- Tong, F., Meng, M., & Blake, R. (2006). Neural bases of binocular rivalry. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*(11), 502-511.
- Tong, F., Nakayama, K., Vaughan, J. T., & Kanwisher, N. (1998). Binocular rivalry and visual awareness in human extrastriate cortex. *Neuron*, *21*, 753-759.

- Toppino, T. C. (2003). Reversible-figure perception: Mechanisms of intentional control. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 65(8), 1285–1295.
- Du Tour, E. F. (1763). Addition au Mémoire intitulé. Discussion d'une question d'optique. *Académie des Sciences. Mémoires de Mathématique et de Physique Présentés par Divers Savants*, 4, 499–511.
- Treisman, A. (1962). Binocular rivalry and stereoscopic depth perception. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 14(1), 23–37.
- Treisman, A. (1988). Features and objects: The fourteenth Bartlett memorial lecture. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A: Human Experimental Psychology*, 40, 201–237.
- Treisman, A., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12(1), 97–136.
- Triesch, J., Ballard, D. H., Hayhoe, M. M., & Sullivan, B. T. (2003). What you see is what you need. *Journal of Vision*, 3(1), 86–94.
- Trommershäuser, J., Maloney, L. T., & Landy, M. S. (2003). Statistical decision theory and the selection of rapid, goal-directed movements. *Journal of the Optical Society of America A*, 20(7), 1419–1433.
- Tsuchiya, N., & Koch, C. (2005). Continuous flash suppression reduces negative afterimages. *Nature neuroscience*, 8(8), 1096–1101.
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1974). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science*, 185(4157), 1124.
- Tyler, C. W., & Sutter, E. E. (1979). Depth from spatial frequency difference: An old kind of stereopsis. *Vision Research*, 19(8), 859–865.
- Vanrie, J., Dekeyser, M., & Verfaillie, K. (2004). Bistability and biasing effects in the perception of ambiguous point-light walkers. *Perception*, 33, 547–560.
- VanRullen, R. (2006). The continuous Wagon Wheel Illusion is object-based. *Vision Research*, 46(24), 4091–4095.
- VanRullen, R., & Koch, C. (2003). Is perception discrete or continuous? *Trends in Cognitive Sciences*, 7(5), 207–213.
- Varela, F. J., & Singer, W. (1987). Neuronal dynamics in the visual corticothalamic pathway revealed through binocular rivalry. *Experimental Brain Research*, 66(1), 10–20.
- Verstraten, F. A., Fredericksen, R. E., & Van De Grind, W. A. (1994). Movement aftereffect of bi-vectorial transparent motion. *Vision Research*, 34(3), 349–358.
- Verstraten, F. A. J., Fredericksen, R. E., Grüsser, O. J., & Van de Grind, W. A. (1994). Recovery from motion adaptation is delayed by successively presented orthogonal motion. *Vision Research*, 34(9), 1149–1155.

- Vetter, G., Haynes, J. D., & Pfaff, S. (2000). Evidence for multistability in the visual perception of pigeons. *Vision Research*, *40*(16), 2177–2186.
- Wade, N. J. (1975). Monocular and binocular rivalry between contours. *Perception*, *4*(1), 85 – 95. doi: 10.1068/p040085.
- Wade, N. J. (1980). The influence of colour and contour rivalry on the magnitude of the tilt illusion. *Vision Research*, *20*(3), 229–233.
- Wade, N. J. (2005). Ambiguities and rivalries in the history of binocular vision. In D. Alais & R. Blake (Eds.), *Binocular rivalry* (pp. 29–46). Cambridge, MA: MIT Press.
- Wade, N. J., Campbell, R. N., Ross, H. E., & Lingelbach, B. (2010). Necker in Scotch perspective. *Perception*, *39*(1), 1.
- Wade, N. J., de Weert, C. M., & Swanston, M. T. (1984). Binocular rivalry with moving patterns. *Perception & psychophysics*, *35*(2), 111–122.
- Wade, N. J., & Wenderoth, P. (1978). The influence of colour and contour rivalry on the magnitude of the tilt after-effect. *Vision Research*, *18*(7), 827–835.
- Wales, R., & Fox, R. (1970). Increment detection thresholds during binocular rivalry suppression. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *8*(2), 90–94.
- Walker, P. (1975a). Stochastic properties of binocular-rivalry alternations. *Perception and Psychophysics*, *18*(6), 467–473.
- Walker, P. (1975b). The subliminal perception of movement and the “suppression” in binocular rivalry. *British Journal of Psychology*, *66*(3), 347–356. doi: 10.1111/j.2044-8295.1975.tb01471.x.
- Walker, P. (1978a). Binocular rivalry: Central or peripheral selective processes. *Psychological Bulletin*, *85*(2), 376–389.
- Walker, P. (1978b). Orientation-selective inhibition and binocular rivalry. *Perception*, *7*(2), 207 – 214. doi: 10.1068/p070207.
- Walker, P., & Powell, D. J. (1979). The sensitivity of binocular rivalry to changes in the nondominant stimulus. *Vision Research*, *19*(3), 247–249.
- Wallace, G. K., & Crampin, D. J. (1969). The effect of background density on the Zöllner illusion. *Vision Research*, *9*(1), 167–177.
- Wallach, H. (1935). Über visuell wahrgenommene Bewegungsrichtung. *Psychological Research*, *20*(1), 325–380.
- Wallach, H., & O’connell, D. N. (1953). The kinetic depth effect. *Journal of Experimental Psychology*, *45*(4), 205.
- Wang, Y., & Jiang, Y. (2011). Binocular depth modulates high-level visual perception without awareness. *Journal of Vision*, in press.

- Waszak, F., Hommel, B., & Allport, A. (2003). Task-switching and long-term priming: Role of episodic stimulus-task bindings in task-shift costs. *Cognitive Psychology*, *46*(4), 361–413.
- Watanabe, K. (1999). Optokinetic nystagmus with spontaneous reversal of transparent motion perception. *Experimental brain research*, *129*(1), 156–160.
- Watanabe, T., Nañez, J. Á. ., & Sasaki, Y. (2001). Perceptual learning without perception. *Ecology*, *82*, 580–598.
- Watanabe, T., Nañez, J. E., Koyama, S., Mukai, I., Liederman, J., & Sasaki, Y. (2002). Greater plasticity in lower-level than higher-level visual motion processing in a passive perceptual learning task. *Nature Neuroscience*, *5*(10), 1003–1009.
- Webster, M. A. (2011). Adaptation and visual coding. *Journal of Vision*, *11*(5).
- Webster, M. A., Kaping, D., Mizokami, Y., & Duhamel, P. (2004). Adaptation to natural facial categories. *Nature*, *428*(6982), 557–561.
- Webster, M. A., & Mollon, J. D. (1991). Changes in colour appearance following post-receptoral adaptation. *Nature*, *349*(6306), 235–238.
- Webster, M. A., & Mollon, J. D. (1994). The influence of contrast adaptation on color appearance. *Vision Research*, *34*(15), 1993–2020.
- Webster, M. A., Werner, J. S., & Field, D. J. (2005). Adaptation and the phenomenology of perception. In C. Clifford & G. Rhodes (Eds.), *Fitting the mind to the world: Adaptation and after-effects in high-level vision* (pp. 241–277). Oxford University Press, USA.
- Weiss, Y., & Adelson, E. H. (1998). Slow and smooth: A Bayesian theory for the combination of local motion signals in human vision. *Center for Biological and Computational Learning Paper*, *158*.
- Weitzman, B. (1963). A threshold difference produced by a figure-ground dichotomy. *Journal of Experimental Psychology*, *66*(2), 201.
- Wheatstone, C. (1838). Contributions to the physiology of vision.–Part the first. On some remarkable, and hitherto unobserved, phenomena of binocular vision. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, *128*, 371–394.
- Whittle, P. (1965). Binocular rivalry and the contrast at contours. *The Quarterly journal of experimental psychology*, *17*(3), 217.
- Whittle, P., Bloor, D., & Pocock, S. (1968). Some experiments on figural effects in binocular rivalry. *Percept. Psychophys*, *4*, 183–188.
- Wiese, M., & Wenderoth, P. (2010). Dichoptic reduction of the direction illusion is not due to binocular rivalry. *Vision Research*, *50*(18), 1824–1832. doi: 10.1016/j.visres.2010.06.003.
- Wiesel, T. N. (1982). The postnatal development of the visual cortex and the influence of environment. *Bioscience Reports*, *2*(6), 351–377.

- Wiesel, T. N., & Hubel, D. H. (1965). Comparison of the effects of unilateral and bilateral eye closure on cortical unit responses in kittens. *Journal of Neurophysiology*, *28*(6), 1029–1040.
- Wiesenfelder, H., & Blake, R. (1992). Binocular rivalry suppression disrupts recovery from motion adaptation. *Visual Neuroscience*, *9*(2), 143.
- Wilson, H. R. (2003). Computational evidence for a rivalry hierarchy in vision. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *100*(24), 14499–14503.
- Wilson, H. R. (2007). Minimal physiological conditions for binocular rivalry and rivalry memory. *Vision Research*, *47*(21), 2741–2750.
- Wilson, H. R., Blake, R., & Lee, S. H. (2001). Dynamics of travelling waves in visual perception. *Nature*, *412*, 907–910.
- Wilson, H. R., & Humanski, R. (1993). Spatial frequency adaptation and contrast gain control. *Vision Research*, *33*(8), 1133–1149. doi: 10.1016/0042-6989(93)90248-U.
- Wittgenstein, L. (1953). *Philosophical Investigations*. New York: GEM Anscombe.
- Wohlgemuth, A. (1911). On the after-effect of seen movement. *British Journal of Psychology: Monograph Supplement*, *1*(7), 1–11.
- Wohlschläger, A. (2000). Visual motion priming by invisible actions. *Vision Research*, *40*(8), 925–930.
- Wolfe, J. (1988). Parallel ideas about stereopsis and binocular rivalry: a reply to Blake and O’Shea(1988). *Psychological Review*, *95*(1), 155–158.
- Wolfe, J. M. (1983). Influence of spatial frequency, luminance, and duration on binocular rivalry and abnormal fusion of briefly presented dichoptic stimuli. *Perception*, *12*(4), 447–456.
- Wolfe, J. M. (1984). Reversing ocular dominance and suppression in a single flash. *Vision Research*, *24*(5), 471–478.
- Wolfe, J. M. (1986). Stereopsis and binocular rivalry. *Psychological Review*, *93*(3), 269–282.
- Wolfe, J. M., & Franzel, S. L. (1988). Binocularity and visual search. *Perception & Psychophysics*, *44*(1), 81–93.
- Wong, E., & Weisstein, N. (1982). A new perceptual context-superiority effect: Line segments are more visible against a figure than against a ground. *Science*, *218*(4572), 587.
- Yang, E., Blake, R., & McDonald, J. E. (2010). A New Interocular Suppression Technique for Measuring Sensory Eye Dominance. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, *51*(1), 588–593. doi: 10.1167/iovs.08-3076.
- Yang, E., Hong, S.-W., & Blake, R. (2010). Adaptation aftereffects to facial expressions suppressed from visual awareness. *Journal of Vision*, *10*(12). doi: 10.1167/10.12.24.
- Yang, E., Zald, D. H., & Blake, R. (2007). Fearful expressions gain preferential access to awareness during continuous flash suppression. *Emotion*, *7*(4), 882–886. doi: 10.1037/1528-3542.7.4.882.

- Yang, Y., Rose, D., & Blake, R. (1992). On the variety of percepts associated with dichoptic viewing of dissimilar monocular stimuli. *Perception, 21*(1), 47–62.
- Zhang, P., Bao, M., Kwon, M., He, S., & Engel, S. A. (2009). Effects of Orientation-Specific Visual Deprivation Induced with Altered Reality. *Current Biology, 19*(22), 1956–1960. doi: 10.1016/j.cub.2009.10.018.
- Zhou, W., & Chen, D. (2009). Binocular Rivalry between the Nostrils and in the Cortex. *Current Biology, 19*(18), 1561–1565. doi: 10.1016/j.cub.2009.07.052.
- Zhou, Y. H., Gao, J. B., White, K. D., Merk, I., & Yao, K. (2004). Perceptual dominance time distributions in multistable visual perception. *Biological cybernetics, 90*(4), 256–263.
- Zimba, L. D., & Blake, R. (1983). Binocular rivalry and semantic processing: Out of sight, out of mind. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 9*(5), 807.
- Zöllner, F. (1860). Über eine neue Art von Pseudoskopie und ihre Beziehungen zu den von Plateau und Opper beschriebenen Bewegungsphaenomenen. *Annual Review of Physical Chemistry, 186*, 500–523. Retrieved August 7, 2011, .

ANNEXES

XVIII. Annexe 1 : Modèle

J'ai rassemblé en introduction de nombreuses données. Je présente ici un modèle possible, qu'il faut considérer comme un résumé graphique des données expérimentales ou un point de départ vers un modèle prédictif, plutôt que comme un réel modèle abouti. J'ai utilisé les conventions graphiques en usage dans la modélisation par réseaux de neurones formels. Il s'agit d'un modèle de rivalité binoculaire : il rassemble donc uniquement les éléments qui sont pertinents pour comprendre la rivalité. La rivalité est un système couplé à la vision stéréoscopique et une compétition entre les yeux, entre orientations, entre couleurs et entre directions de mouvement. Le modèle a donc quatre sorties : orientation, couleur, stéréo et mouvement et implique des neurones formels sensibles à ces quatre attributs. Le modèle complet est présenté en Figure 46.

XVIII.A Rivalité d'orientation

XVIII.A.1 Réseau de base

La partie spécifique à la rivalité d'orientation est présentée en Figure 42. Elle comprend une suppression interoculaire et une compétition entre orientations. Un premier niveau de neurones orientés monoculaires, sans compétition, nourrit un deuxième niveau binoculaire (sans compétition non plus). Ces niveaux s'adaptent, créant les deux composantes des effets consécutifs d'orientation et leur transfert interoculaire partiel. Un troisième niveau subit la compétition inter-orientation (inter-neurones s'adaptant pour créer les renversements). Ce troisième niveau est nécessaire pour rendre compte des effets consécutifs d'orientation malgré la rivalité binoculaire. Cette partie du modèle est presque identique au modèle de Lumer (1998), basé sur des données anatomiques. Le troisième niveau nourrit un quatrième niveau. Ce quatrième niveau est composé de neurones monoculaires orientés qui reçoivent aussi des entrées du premier niveau monoculaire. Ces neurones subissent une forte suppression interoculaire (non-spécifique à l'orientation codée par les neurones) mais l'absence d'adaptation à ce niveau l'empêche de générer des renversements. Ce niveau hérite donc des effets consécutifs des niveaux inférieurs ainsi que des renversements qui ont lieu au niveau binoculaire inférieur. Ce niveau monoculaire nourrit un cinquième niveau binoculaire (fusion) qui est la sortie du réseau. Le fait que la suppression interoculaire ait lieu à un niveau supérieur de la hiérarchie comparé à la rivalité entre orientations permet de rendre compte du phénomène de renversement systématique quand les stimuli sont échangés entre les yeux et de la perception d'un plaid lorsqu'il n'y a pas de présentation dichoptique. Nous retrouvons la

séparation entre mécanismes de renversement et de suppression (introduction, section I.B.9). Cette partie du modèle est une évolution naturelle du modèle hiérarchique de Wilson. Il est aussi une évolution et une simplification du modèle de Wolfe (1986). Tel quel, il ne permet pas de rendre compte des données sur la détectabilité de cibles (qui est aussi bonne en vision normale qu'en phase dominante de la rivalité) : malgré la fusion, la suppression interoculaire ne rend accessible que l'information venant d'un œil. Une correction du modèle serait d'intégrer une couche supplémentaire entre les deux couches monoculaires, avec une porte XOR comme dans le modèle de Blake (cf. Introduction, section II.G et Figure 21).

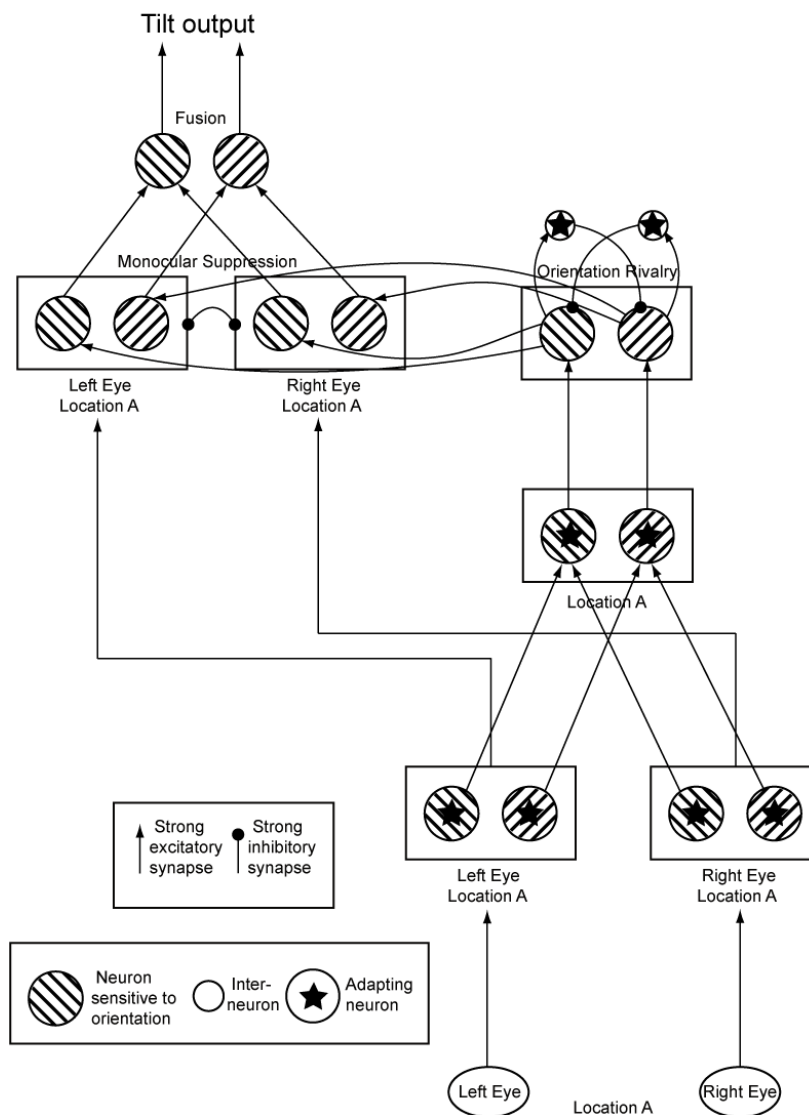


Figure 42 : Représentation de la partie du modèle spécifique à la rivalité d'orientation. La représentation est simplifiée à deux orientations perpendiculaires uniquement. La suppression interoculaire est ici représentée à l'aide d'une connexion inhibitrice double ; il s'agit de deux inter-neurons inhibiteurs indépendants et dans des sens opposés reliant deux à deux tous les couples de neurones codant pour un œil d'origine différent.

XVIII.A.2 Illusions et groupements interoculaires

J'ajoute maintenant au modèle les illusions d'orientation que nous avons vues : centre-pourtour et illusion de Zöllner. La première a deux composantes, une monoculaire et une binoculaire. Elle s'explique par une inhibition latérale de courte portée, faible et non-spécifique (Bosking, Zhang, Schofield, & Fitzpatrick, 1997; Kisvarday, Toth, Rausch, & Eysel, 1997). Elle est représentée en Figure 43 entre deux positions adjacentes. L'illusion de Zöllner a lieu localement et de manière monoculaire. Ces illusions ont lieu ici plutôt qu'au second niveau monoculaire car elles influencent aussi la vision stéréoscopique. Celle-ci partira de ce premier niveau car le second niveau monoculaire subit une forte suppression interoculaire. Le niveau binoculaire est le candidat idéal pour la composante binoculaire de l'illusion centre-pourtour (qui ne doit pas subir la suppression inter-orientation). Les groupements interoculaires ont lieu au même niveau pour les mêmes raisons. Ils nécessitent de longues et faibles connexions entre unités orientées colinéaires à des positions adjacentes (Bosking et al., 1997; Gilbert & Wiesel, 1983; Kisvarday et al., 1997). Cette solution est utilisée classiquement dans d'autres modèles de groupement (Grossberg et al., 2008; Hansen, 2002).

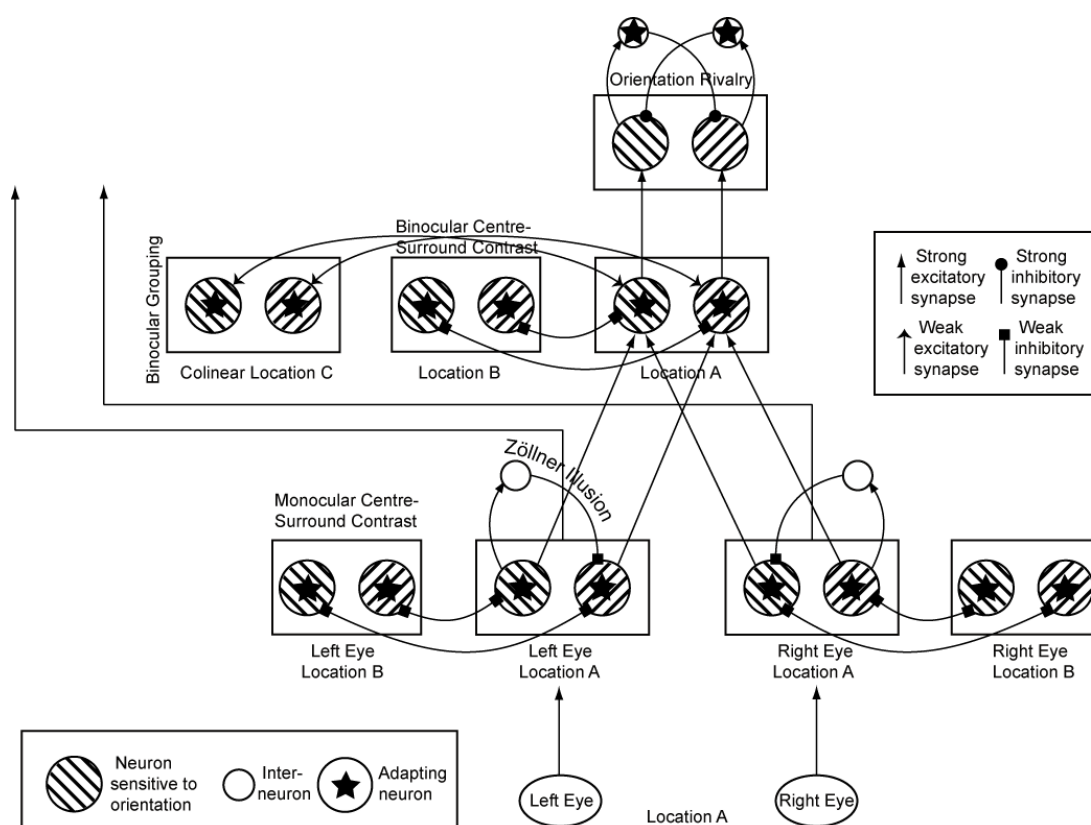


Figure 43 : Ajout des illusions d'orientation et des groupements interoculaires.

XVIII.A.3 Vision stéréoscopique

Cette thèse ne porte pas en détail sur le calcul opérée par la vision stéréoscopique mais un modèle correct de l'intégration binoculaire doit être capable de rendre la vision stéréoscopique possible. Je présente dans la boîte en Figure 44 une manière simple de faire ce calcul pour la vision stéréoscopique issue des disparités d'orientation. Le premier niveau monoculaire nourrit les niveaux propres au calcul stéréoscopique. Ces niveaux ne peuvent pas recevoir d'entrées d'un autre niveau car les autres niveaux ont déjà fusionné binoculairement et le seul autre niveau monoculaire subit une forte suppression interoculaire. Les unités monoculaires codant pour la même orientation excitent un neurone d'une couche de neurones à seuil haut. Ceux-ci ne déchargent que lorsque deux neurones qui leur sont connectés déchargent en même temps (porte ET), c'est-à-dire quand la même orientation est présentée dans chaque œil. Cette couche à seuil haut est elle-même connectée à une couche de neurones normaux (porte OU). Ceux-ci codent pour une disparité nulle. D'autres neurones codent pour toutes les disparités fusionnables : ils sont connectés à des neurones de la couche inférieure qui sont eux-mêmes connectés à deux orientations dont la différence est égale à la disparité d'orientation codée.

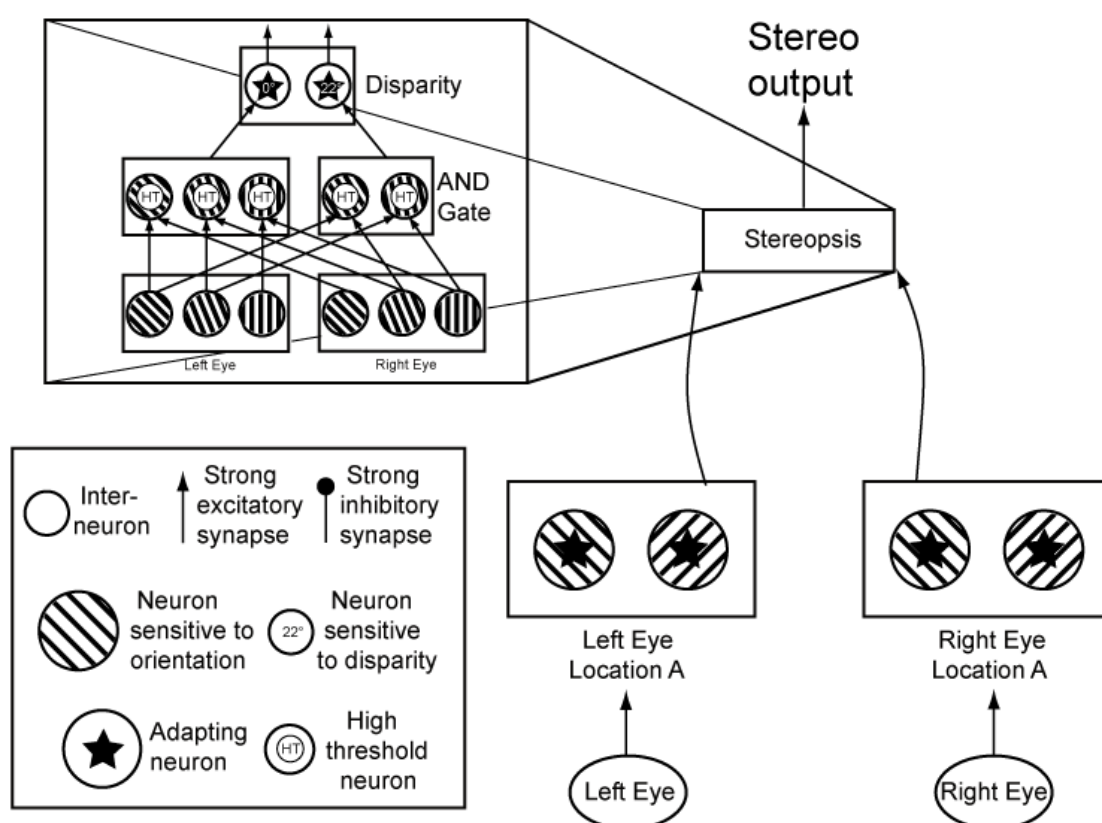


Figure 44 : Vision stéréoscopique à partir du premier niveau monoculaire.

XVIII.A.4 Rivalité de mouvement

Ce modèle n'est pas un modèle du mouvement. Nous ne tiendrons pas compte ni du fait que différents sous-systèmes de mouvement existent, pour les mouvements lents ou rapides (van De Grind et al., 2001), pour les variations de luminance, de contraste ou de texture, ni de la manière de calculer ce mouvement comme les modèles d'énergie ou la poursuite d'attributs (Lu & Sperling, 1995). Notamment, des détecteurs de mouvement après la fusion binoculaire existent (Carney, 1997; Shadlen & Carney, 1986). Nous nous concentrerons sur le mouvement issu du déplacement de lignes orientées (et non de points). Le mouvement est d'abord intégré monoculairement : l'extraction du signal de mouvement prend donc pour origine le premier niveau monoculaire pour les mêmes raisons évoquées à propos du calcul stéréoscopique. Le niveau codant pour le mouvement monoculaire fusionne en un niveau binoculaire. Les deux niveaux subissent une adaptation et vont donc produire des effets consécutifs et un transfert partiel interoculaire. Le niveau de suppression est binoculaire, rendant compte de l'effet partiel de la rivalité de mouvement sur l'effet consécutif de mouvement. La répulsion entre mouvements a lieu après cette rivalité. De plus, les niveaux codant pour le mouvement monoculaire excitent directement le niveau monoculaire des orientations qui subit la suppression interoculaire. De cette manière, l'effet des perturbations et de l'attention exogène est simulé.

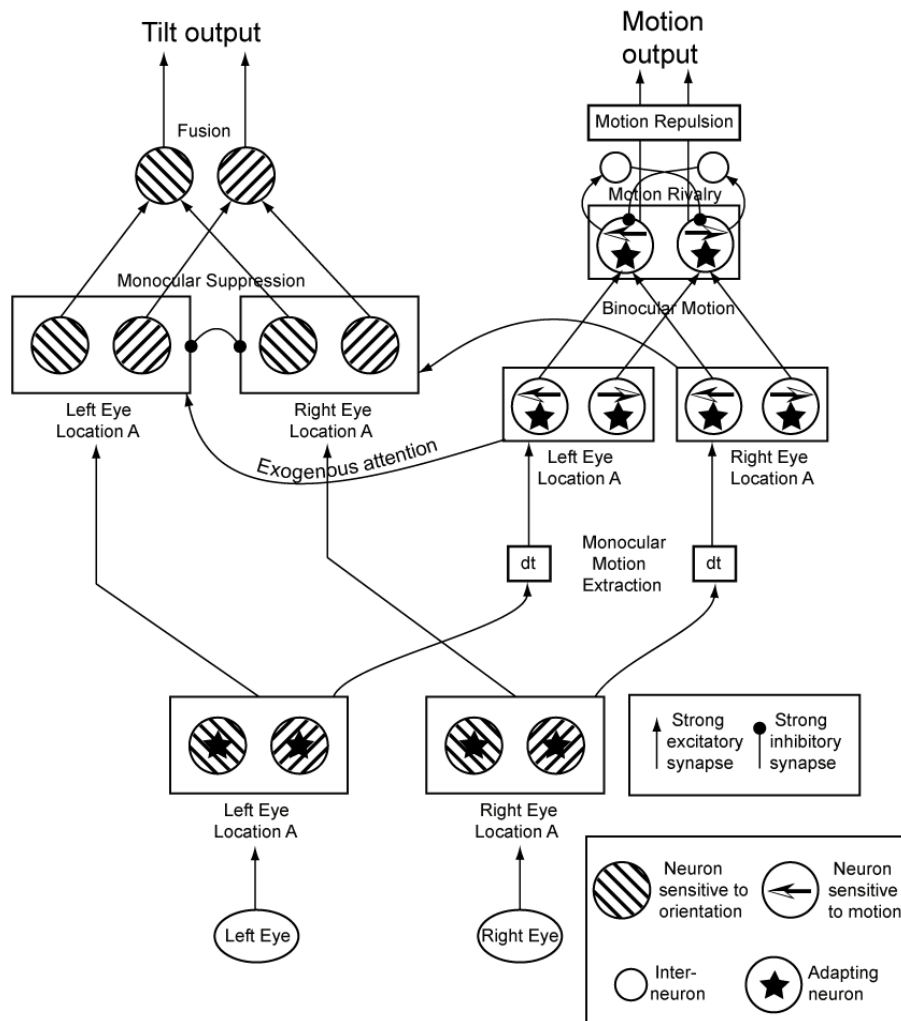


Figure 45 : Rivalité de mouvement et attention exogène.

XVIII.A.5 Modèle complet

A ce que nous avons vu ne se rajoute que la rivalité de couleur, sur laquelle très peu de données existent, notamment sur la survenue de l'effet consécutif de couleur pendant la rivalité binoculaire. Nous savons seulement que l'induction chromatique a lieu de manière monoculaire avant le site de suppression. Le modèle complet est disponible en Figure 46.

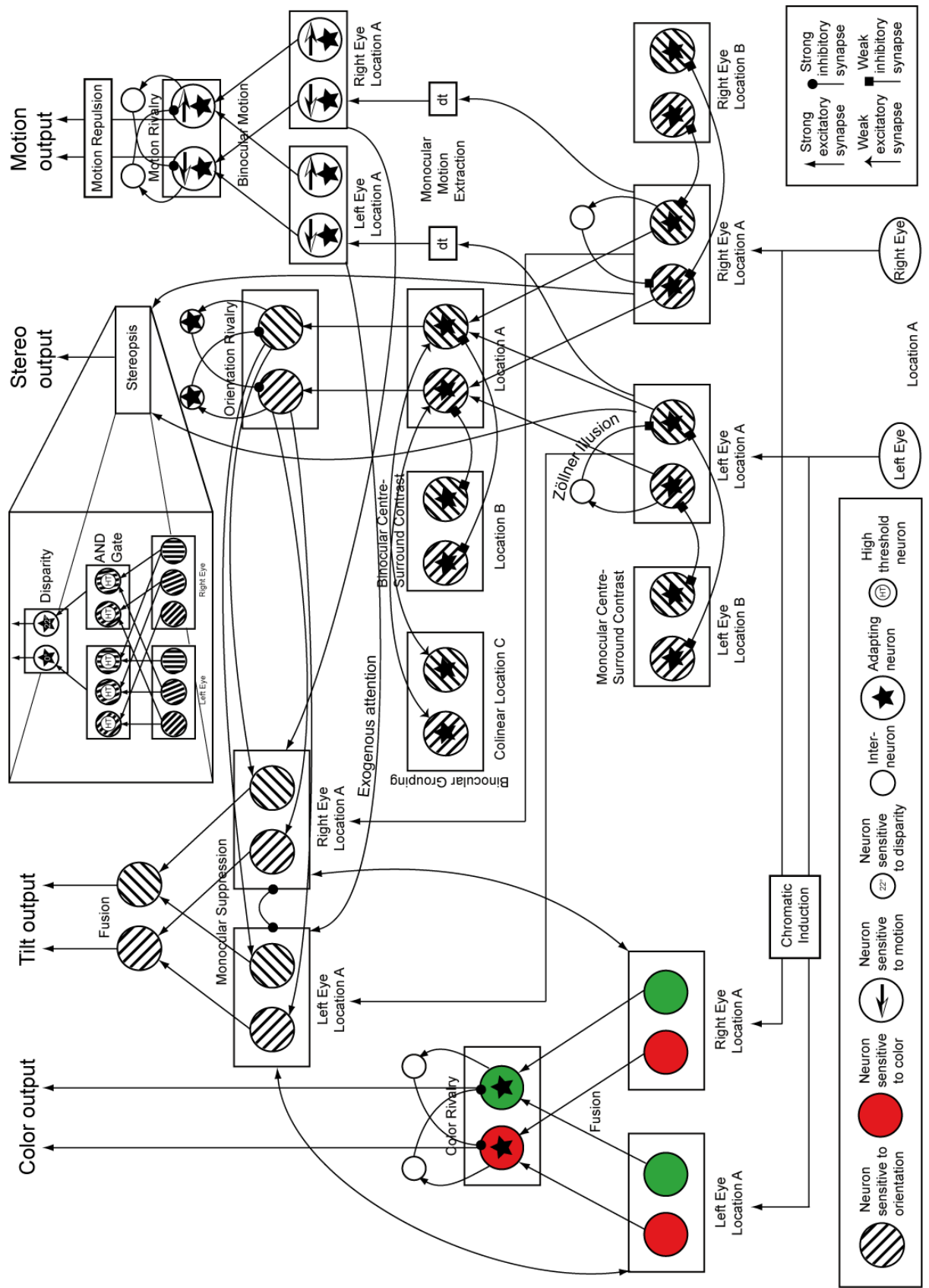


Figure 46 : Modèle complet.

XIX. Annexe 2 : Article

XIX.A Harris, J., Chopin, A., Zeiner, K., & Hibbard, P. (in press). Perception of relative depth interval: systematic biases in perceived depth. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*.

Disponible en ligne :

<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17470218.2011.589520>

XX. Material

XX.A Stereoscopic devices for stereopsis and rivalry

For a review of all stereoscopic technics: (Law et al., 2013)

Shutter glasses are dependent on the screen precision (notably, the 120 Hz frame rate and the high speed ignition and shut down of phosphors). Lack of a high-end screen will then cause significant leakage because the phosphors do not shut off quickly enough. Main problem with shutter glasses is therefore price of the high quality material.

Passive lens with polarization screens is a good solution to do stereopsis because technology became recently good enough: see for example this polarisation screen (glasses included) compatible with the relevant 3d format (best is line by line / updown) with hdmi input (270 eur but expect more for better resolutions). <http://www.lcd-compare.com/moniteur-LGD2542P-LG-D2542P-PN.htm>

For the stereoscope, version 2 in this link is best Blake's solution:

<http://www.psy.vanderbilt.edu/faculty/blake/Stereoscope/stereoscope.html>

ADDITIONAL BIBLIOGRAPHY (ENDNOTE)

- Ahissar, M., & Hochstein, S. (1993). Attentional control of early perceptual learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 90(12).
- Alexander, Kenneth R., Xie, W. E. I., & Derlacki, Deborah J. (1997). Visual Acuity and Contrast Sensitivity for Individual Sloan Letters. *Vision Research*, 37(6), 813-819. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0042-6989\(96\)00190-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0042-6989(96)00190-3)
- Anderson, Charles H., & Van Essen, David C. (1987). Shifter circuits: a computational strategy for dynamic aspects of visual processing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 84(17), 6297-6301.
- Backus, B T, & Matza-Brown, D. (2003). The contribution of vergence change to the measurement of relative disparity. *Journal of Vision*, 3(11).
- Badcock, D R, & Schor, C M. (1985). Depth-increment detection function for individual spatial channels. *JOSA A*, 2(7), 1211-1215.
- Ball, K., & Sekuler, R. (1987). Direction-specific improvement in motion discrimination. *Vision Research*, 27(6), 953-965.
- Barbeito, R., Levi, D M., Klein, S. A., Loshin, D, & Ono, H. (1985). Stereo-deficients and stereoblinds cannot make utrocular discriminations. *Vision Research*, 25(9), 1345-1348. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(85\)90052-5](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(85)90052-5)
- Barrett, Brendan T., Panesar, Gurvinder K., Scally, Andrew J., & Pacey, Ian E. (2012). A Limited Role for Suppression in the Central Field of Individuals with Strabismic Amblyopia. *PLoS One*, 7(5), e36611. doi: 10.1371/journal.pone.0036611
- Berger, A., Henik, A., & Rafal, R. (2005). Competition between endogenous and exogenous orienting of visual attention. *Journal of Experimental Psychology: General*, 134(2), 207-221.
- Berkeley, George. (1709). *An essay towards a new theory of vision*: Aaron Rhames.
- Bishop, P.O. (1989). Vertical disparity, egocentric distance and stereoscopic depth constancy: a new interpretation. *Proceedings of the Royal Society of London. B. Biological Sciences*, 237(1289), 445-469.
- Blake, Randolph, & Cormack, Robert H. (1979). On utrocular discrimination. *Perception & Psychophysics*, 26(1), 53-68.
- Blakemore, C, Fiorentini, A, & Maffei, L. (1972). A second neural mechanism of binocular depth discrimination. *The Journal of physiology*, 226(3), 725-749.
- Blakemore, C. (1970). The range and scope of binocular depth discrimination in man. *The Journal of physiology*, 211(3), 599-622.
- Bourdon, Benjamin. (1902). *La perception visuelle de l'espace*. Paris: Schleicher frères.
- Bradshaw, M F., & Glennerster, A. (2006). Stereoscopic acuity and observation distance. *Spatial Vision*, 19(1), 21-36. doi: 10.1163/156856806775009250
- Brenner, E, & Van Damme, W JM. (1998). Judging distance from ocular convergence. *Vision research*, 38(4), 493-498.
- Brenner, Eli, Smeets, Jeroen BJ, & Landy, Michael S. (2001). How vertical disparities assist judgements of distance. *Vision Research*, 41(25), 3455-3466.
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and Communication*: Pergamon.
- Brooks, Kevin R., & Stone, Leland S. (2004). Stereomotion speed perception: Contributions from both changing disparity and interocular velocity difference over a range of relative disparities. *Journal of Vision*, 4(12). doi: 10.1167/4.12.6
- Brown, J P, Ogle, K N, & Reiher, L. (1965). Stereoscopic acuity and observation distance. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 4(5), 894-900.
- Brown, LawrenceG. (1996). Additional rules for the transformed up-down method in psychophysics. *Perception & Psychophysics*, 58(6), 959-962. doi: 10.3758/BF03205497
- Buckley, David, & Frisby, John P. (1993). Interaction of stereo, texture and outline cues in the shape perception of three-dimensional ridges. *Vision Research*, 33(7), 919-933. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(93\)90075-8](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(93)90075-8)

- Button, Katherine S, Ioannidis, John PA, Mokrysz, Claire, Nosek, Brian A, Flint, Jonathan, Robinson, Emma SJ, & Munafò, Marcus R. (2013). Power failure: why small sample size undermines the reliability of neuroscience. *Nature Reviews Neuroscience*.
- Chun, M. M., & Jiang, Y. (1998). Contextual Cueing: Implicit Learning and Memory of Visual Context Guides Spatial Attention. *Cognitive Psychology*, 36(1), 28-71.
- Crist, R. E., Kapadia, M. K., Westheimer, G., & Gilbert, C. D. (1997). Perceptual learning of spatial localization: specificity for orientation, position, and context. *Journal of neurophysiology*, 78(6), 2889-2894.
- Cutting, J. E., & Vishton, P. M. (1995). Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In W. Epstein & S. Rogers (Eds.), *Handbook of perception and cognition* (Vol. 5, pp. 69-117). San Diego, CA: Academic Press.
- da Vinci, Leonardo. (1970). *The notebooks of Leonardo da Vinci*: Dover Publications.
- Dodgson, Neil A. (2004). *Variation and extrema of human interpupillary distance*. Paper presented at the Electronic Imaging 2004.
- Donzis, P. B., Rappazzo, J., Bürde, R. M., & Gordon, M. (1983). Effect of binocular variations of snellen visual acuity on titmus stereoacuity. *Archives of Ophthalmology*, 101(6), 930-932. doi: 10.1001/archophth.1983.01040010930016
- Enright, JT. (1991). Exploring the third dimension with eye movements: better than stereopsis. *Vision research*, 31(9), 1549-1562.
- Erkelens, C. J., & Collewijn, H. (1985a). Eye movements and stereopsis during dichoptic viewing of moving random-dot stereograms. *Vision Research*, 25(11), 1689-1700. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(85\)90141-5](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(85)90141-5)
- Erkelens, C. J., & Collewijn, H. (1985b). Eye movements in relation to loss and regaining of fusion of disjunctively moving random-dot stereograms. *Human neurobiology*, 4(3), 181-188.
- Erkelens, C. J., & Collewijn, H. (1985c). Motion perception during dichoptic viewing of moving random-dot stereograms. *Vision Research*, 25(4), 583-588. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(85\)90164-6](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(85)90164-6)
- Fahle, M. (1994). Human pattern recognition: parallel processing and perceptual learning. *Perception*, 23(4), 411-427. doi: 10.1068/p230411
- Fahle, M. (1997). Specificity of learning curvature, orientation, and vernier discriminations. *Vision Res*, 37(14), 1885-1895.
- Fahle, M., & Edelman, S. (1993). Long-term learning in vernier acuity: Effects of stimulus orientation, range and of feedback. *Vision Research*, 33(3), 397-412.
- Fahle, M., Edelman, S., & Poggio, T. (1995). Fast perceptual learning in hyperacuity. *Vision Research*, 35(21), 3003-3013. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00044-Z](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(95)00044-Z)
- Fahle, M., & Morgan, M. J. (1996). No transfer of perceptual learning between similar stimuli in the same retinal position. *Current biology : CB*, 6(3), 292-297.
- Farell, Bart, Li, Simone, & McKee, S P. (2004a). Coarse scales, fine scales, and their interactions in stereo vision. *Journal of Vision*, 4(6).
- Farell, Bart, Li, Simone, & McKee, S P. (2004b). Disparity increment thresholds for gratings. *Journal of Vision*, 4(3).
- Foley, J. M., & Richards, W. (1974). Improvement in stereoanomaly with practice. *American journal of optometry and physiological optics*, 51(12).
- Foley, JM, & Richards, Whitman. (1972). Effects of voluntary eye movement and convergence on the binocular appreciation of depth. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 11(6), 423-427.
- Frisby, J. P., Buckley, D., & Duke, P. A. (1996). Evidence for good recovery of lengths of real objects seen with natural stereo viewing. *Perception*, 25(2), 129-154.
- Geng, J. J., & Behrmann, M. (2002). Probability Cuing of Target Location Facilitates Visual Search Implicitly in Normal Participants and Patients with Hemispatial Neglect. *Psychological Science*, 13(6), 520-525.
- Geng, J. J., & Behrmann, M. (2005). Spatial probability as an attentional cue in visual search. *Perception & Psychophysics*, 67(7), 1252-1268.

- Georgeson, Mark A, Freeman, Tom CA, & Scott-Samuel, Nicholas E. (1996). Sub-pixel accuracy: psychophysical validation of an algorithm for fine positioning and movement of dots on visual displays. *Vision Research*, 36(4), 605-612.
- Gillam, B, & Borsting, E. (1988). The role of monocular regions in stereoscopic displays. *Perception*, 17, 603-608.
- Gillam, B., & Rogers, B. (1991). Orientation disparity, deformation, and stereoscopic slant perception. *Perception*, 20(4), 441-448.
- Gogel, Walter C. (1961). Convergence as a Cue to the Perceived Distance of Objects in a Binocular Configuration. *The Journal of Psychology*, 52(2), 303-315. doi: 10.1080/00223980.1961.9916530
- Green, C Shawn, & Bavelier, Daphne. (2003). Action video game modifies visual selective attention. *Nature*, 423(6939), 534-537.
- Grossberg, S., & Swaminathan, G. (2004). A laminar cortical model for 3D perception of slanted and curved surfaces and of 2D images: development, attention, and bistability. *Vision Research*, 44(11), 1147-1187.
- Hampshire, Adam, Highfield, Roger R, Parkin, Beth L, & Owen, Adrian M. (2012). Fractionating Human Intelligence. *Neuron*, 76(6), 1225-1237. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuron.2012.06.022>
- Harris, Julie M. (2006). The interaction of eye movements and retinal signals during the perception of 3-D motion direction. *Journal of vision*, 6(8).
- Held, Robert T, Cooper, Emily A, & Banks, Martin S. (2012). Blur and Disparity Are Complementary Cues to Depth. *Current Biology*, 22(5), 426-431. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2012.01.033>
- Hendrickson, A. E., Movshon, J. A., Eggers, H. M., Gizzi, M. S., Boothe, R. G., & Kiorpes, L. (1987). Effects of early unilateral blur on the macaque's visual system. II. Anatomical observations. *J Neurosci*, 7(5), 1327-1339.
- Herbomel, Philippe, & Ninio, J. (1993). Processing of linear elements in stereopsis: Effects of positional and orientational distinctiveness. *Vision Research*, 33(13), 1813-1825. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(93\)90172-S](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(93)90172-S)
- Heron, Suzanne, & Lages, Martin. (2012). Screening and sampling in studies of binocular vision. *Vision Research*, 62(0), 228-234. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.visres.2012.04.012>
- Hess, RF, Hutchinson, CV, Ledgeway, T, & Mansouri, Babak. (2007). Binocular influences on global motion processing in the human visual system. *Vision research*, 47(12), 1682-1692.
- Hess, Robert F, & Wilcox, Laurie M. (1994). Linear and non-linear filtering in stereopsis. *Vision Research*, 34(18), 2431-2438.
- Hessa, Robert F, & Wilcox, Laurie M. (2008). The transient nature of 2nd-order stereopsis. *Vision research*, 48, 1327-1334.
- Hoffmann, J., & Kunde, W. (1999). Location-specific target expectancies in visual search. *Journal of Experimental Psychology. Human perception and performance*, 25(4), 1127-1141.
- Holladay, Jack T. (1997). Proper method for calculating average visual acuity. *Journal of Refractive Surgery*, 13, 388-391.
- Howard, I.P., & Rogers, B.J. (2012). *Perceiving in Depth*. New York: Oxford University Press.
- Jensen, A. R. (2002). Psychometric g: Definition and substantiation. In R. J. S. E. L. Grigorenko (Ed.), *The general factor of intelligence: How general is it?* (pp. 39-53). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Jones, R. (1977). Anomalies of disparity detection in the human visual system. *The Journal of Physiology*, 264(3), 621-640.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*: Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ.
- Karni, A, & Sagi, D. (1991). Where practice makes perfect in texture discrimination: evidence for primary visual cortex plasticity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 88(11), 4966-4970.
- Kersten, D., Knill, D. C., Mamassian, P., & Buelthoff, I. (1996). Illusory motion from shadows. *Nature*, 379(6560), 31-31.

- Kersten, D., Mamassian, P., & Knill, D. C. (1997). Moving cast shadows induce apparent motion in depth. *Perception*, 26, 171-192.
- Kersten, D., Mamassian, P., & Yuille, A. (2004). Object Perception as Bayesian Inference. *Annual Review of Psychology*, 55, 271-304.
- Kording, Konrad P., & Wolpert, Daniel M. (2004). Bayesian integration in sensorimotor learning. *Nature*, 427(6971), 244-247.
- Langley, Keith, Fleet, David J, & Hibbard, Paul B. (1999). Stereopsis from contrast envelopes. *Vision Research*, 39(14), 2313-2324.
- Li, Jinrong, Hess, Robert F, Chan, Lily YL, Deng, Daming, Chen, Xiang, Yu, Minbin, & Thompson, Benjamin S. (2013). How Best to Assess Suppression in Patients with High Anisometropia. *Optometry & Vision Science*, 90(2), e47-e52.
- Lim Lee, Young, & Saunders, Jeffrey A. (2011). Stereo improves 3D shape discrimination even when rich monocular shape cues are available. *Journal of Vision*, 11(9). doi: 10.1167/11.9.6
- Lutigheid, A, Wilcox, L. M., Allison, R S., & Howard, I.P. (2012). Depth from diplopic stimuli without vergence eye movements. *Journal of Vision*, 12(9), 451-451.
- Mamassian, P. (2006). Bayesian inference of form and shape. In S. Martinez-Conde, S. L. Macknik, L. M. Martinez, J. M. Alonso & P. U. Tse (Eds.), *Progress in Brain Research* (Vol. 154): Elsevier B.V.
- Mamassian, P., Knill, D. C., & Kersten, D. (1998). The perception of cast shadows. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(8), 288-295.
- Mamassian, P., & Landy, M. S. (1998). Observer biases in the 3D interpretation of line drawings. *Vision Research*, 38(18), 2817-2832.
- Mamassian, P., Landy, M. S., & Maloney, L. T. (2002). Bayesian Modelling of Visual Perception. In R. Rao, B. Olshausen & M. Lewicki (Eds.), *Probabilistic Models of the Brain: Perception and Neural Function* (pp. 13-36). Cambridge, MA: MIT Press.
- Mansouri, B., Thompson, B., & Hess, R. F. (2008). Measurement of suprathreshold binocular interactions in amblyopia. *Vision Research*, 48(28), 2775-2784. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.visres.2008.09.002>
- McColl, S. L., Ziegler, L., & Hess, R. F. (2000). Stereodeficient subjects demonstrate non-linear stereopsis. *Vision Research*, 40(9), 1167-1177.
- McGovern, David P., Webb, Ben S., & Peirce, Jonathan W. (2012). Transfer of perceptual learning between different visual tasks. *Journal of Vision*, 12(11). doi: 10.1167/12.11.4
- McKee, S P, Levi, D M., & Bowne, S F. (1990). The imprecision of stereopsis. *Vision Research*, 30(11), 1763-1779. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(90\)90158-H](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(90)90158-H)
- McKee, S P, Verghese, P, Ma-Wyatt, A., & Petrov, Y. (2007). The wallpaper illusion explained. *Journal of vision*, 7(14).
- McKee, S P, Welch, L, Taylor, D G, & Bowne, S F. (1990). Finding the common bond: Stereoacuity and the other hyperacuties. *Vision Research*, 30(6), 879-891.
- McKee, Suzanne P, & Levi, Dennis M. (1987). Dichoptic hyperacuity: the precision of nonius alignment. *JOSA A*, 4(6), 1104-1108.
- Mollon, J. D., & Danilova, M. V. (1996). Three remarks on perceptual learning. *Spat Vis*, 10(1), 51-58.
- Moray, N. (1959). Attention in dichotic listening: Affective cues and the influence of instructions. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 11(1), 56-60.
- Morgan, M. J., & Castet, E. (1997). The aperture problem in stereopsis. *Vision Research*, 37(19), 2737-2744. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0042-6989\(97\)00074-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0042-6989(97)00074-6)
- Morgan, Michael J. (1992). On the scaling of size judgements by orientational cues. *Vision research*, 32(8), 1433-1445.
- Morgan, MJ, & Aiba, TS. (1985). Vernier acuity predicted from changes in the light distribution of the retinal image. *Spatial Vision*, 1(2), 151-161.
- Morgan, MJ, Watamaniuk, SNJ, & McKee, S P. (2000). The use of an implicit standard for measuring discrimination thresholds. *Vision research*, 40(17), 2341-2349.
- Motter, BC, & Poggio, GF. (1984). Binocular fixation in the rhesus monkey: spatial and temporal characteristics. *Experimental Brain Research*, 54(2), 304-314.

- Nefs, H. T., O'Hare, L., & Harris, J. M. (2010). Two independent mechanisms for motion-in-depth perception: evidence from individual differences. *Frontiers in Psychology, 1*, 155. doi: 10.3389/fpsyg.2010.00155
- Nefs, Harold, & Harris, Julie. (2010). What visual information is used for stereoscopic depth displacement discrimination. *Perception.*
- Neri, Peter, Bridge, Holly, & Heeger, David J. (2004). Stereoscopic processing of absolute and relative disparity in human visual cortex. *Journal of Neurophysiology, 92*(3), 1880-1891.
- Ninio, J. (1981). Random-curve stereograms: a flexible tool for the study of binocular vision. *Perception, 10*(4), 403-410.
- Ninio, J. (1985). Orientational versus horizontal disparity in the stereoscopic appreciation of slant. *Perception, 14*(3), 305-314.
- Ninio, J., & Herlin, I (1988). Speed and accuracy of 3d interpretation of linear stereograms. *Vision Research, 28*(11), 1223-1233. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(88\)90038-7](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(88)90038-7)
- Norman, J. Farley, Holmin, Jessica S., & Bartholomew, Ashley N. (2011). Visual memories for perceived length are well preserved in older adults. *Vision Research, 51*(18), 2057-2062. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.visres.2011.07.022>
- Ogle, K. N. (1952a). Disparity limits of stereopsis. *Archives of Ophthalmology, 48*(1), 50-60. doi: 10.1001/archophth.1952.00920010053008
- Ogle, K. N. (1952b). On the limits of stereoscopic vision. *Journal of Experimental Psychology, 44*(4), 253-259.
- Ogle, K. N. (1953). Precision and Validity of Stereoscopic Depth Perception from Double Images. *J. Opt. Soc. Am., 43*(10), 906-913.
- Ohlsson, Josefin, Villarreal, Gerardo, Abrahamsson, Maths, Cavazos, Humberto, Sjöström, Anders, & Sjöstrand, Johan. (2001). Screening merits of the Lang II, Frisby, Randot, Titmus, and TNO stereo tests. *Journal of American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus, 5*(5), 316-322. doi: <http://dx.doi.org/10.1067/mpa.2001.118669>
- Palmer, D. A. (1961). Measurement of the Horizontal Extent of Panum's Area by a Method of Constant Stimuli. *Optica Acta: International Journal of Optics, 8*(2), 151-159. doi: 10.1080/713826374
- Palmisano, S, Gillam, B, Govan, D G., Allison, R S., & Harris, J M. (2010). Stereoscopic perception of real depths at large distances. *Journal of Vision, 10*(6). doi: 10.1167/10.6.19
- Parker, A J. (2007). Binocular depth perception and the cerebral cortex. *Nature Reviews Neuroscience, 8*(5), 379-391.
- Patterson, Robert, Cayko, Ron, Short, G. Larry, Flanagan, Rita, Moe, Linda, Taylor, Eloise, & Day, Pam. (1995). Temporal integration differences between crossed and uncrossed stereoscopic mechanisms. *Perception & Psychophysics, 57*(6), 891-897. doi: 10.3758/BF03206803
- Patterson, Robert, & Fox, Robert. (1984). The effect of testing method on stereoanomaly. *Vision Research, 24*(5), 403-408. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(84\)90038-5](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(84)90038-5)
- Peterson, C.H., Wensveen, J.M., & Harwerth, R.S. (2004). The relative effects of Gabor bandwidth and reference-test separation on stereopsis. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci., 45*(5), 4323-.
- Platt, J. R. (1960). How we see straight Lines. *Sci Am, 202*, 121-129.
- Poggio, T., Fahle, M., & Edelman, S. (1992). Fast perceptual learning in visual hyperacuity. *Science, 256*(5059), 1018-1021.
- Posner, M. I., Nissen, M. J., & Ogden, W. C. (1978). Attended and unattended processing modes: The role of set for spatial location. *Modes of perceiving and processing information, 137-157.*
- Pouget, A., & Sejnowski, T J. (1994). A neural model of the cortical representation of egocentric distance. *Cerebral Cortex, 4*, 314-314.
- Rashbass, C, & Westheimer, Gv. (1961). Disjunctive eye movements. *The Journal of Physiology, 159*(2), 339-360.
- Regan, D, Erkelens, C J, & Collewijn, H. (1986a). Necessary conditions for the perception of motion in depth. *Investigative Ophthalmology & Visual Science, 27*(4), 584-597.

- Regan, D, Erkelens, C J, & Collewijn, H. (1986b). Visual field defects for vergence eye movements and for stereomotion perception. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 27(5), 806-819.
- Reinecke, R. D., & Simons, K. (1974). A new stereoscopic test for amblyopia screening. *American Journal of Ophthalmology*, 78(4), 714-721.
- Richards, W. (1970). Stereopsis and stereoblindness. *Experimental Brain Research*, 10(4), 380-388.
- Richards, W. (1971). Anomalous Stereoscopic Depth Perception. *J. Opt. Soc. Am.*, 61(3), 410-414.
- Richards, W. (1977). Stereopsis with and without monocular contours. *Vision Research*, 17(8), 967-969. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(77\)90072-4](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(77)90072-4)
- Richards, Whitman, & Miller, JohnF. (1969). Convergence as a cue to depth. *Perception & Psychophysics*, 5(5), 317-320. doi: 10.3758/BF03209573
- Rogers, B J, & Bradshaw, M F. (1995). Disparity scaling and the perception of frontoparallel surfaces. *Perception-London*, 24(1), 155-180.
- Ross, John, & Burr, David C. (2010). Vision senses number directly. *Journal of Vision*, 10(2).
- Rychkova, SI, & Ninio, J. (2009). Paradoxical fusion of two images and depth perception with a squinting eye. *Vision research*, 49(5), 530-535.
- Shortess, George K, & Krauskopf, John. (1961). Role of involuntary eye movements in stereoscopic acuity. *JOSA*, 51(5), 555-559.
- Siderov, J, & Harwerth, R S. (1993). Precision of stereoscopic depth perception from double images. *Vision Research*, 33(11), 1553-1560. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(93\)90148-P](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(93)90148-P)
- Spearman, C. (1904). "General Intelligence," Objectively Determined and Measured. *The American Journal of Psychology*, 15(2), 201-292. doi: 10.2307/1412107
- Strobach, Tilo, Frensch, Peter A., & Schubert, Torsten. (2012). Video game practice optimizes executive control skills in dual-task and task switching situations. *Acta Psychologica*, 140(1), 13-24. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actpsy.2012.02.001>
- Tam, W. J., & Stelmach, L. B. (1998). Display duration and stereoscopic depth discrimination. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 52(1).
- Teichner, Warren H, Kobrick, John L, & Wehrkamp, Robert F. (1955). The effects of terrain and observation distance on relative depth discrimination. *The American journal of psychology*, 68(2), 193-208.
- Thompson, William B., Willemsen, Peter, Gooch, Amy A., Creem-Regehr, Sarah H., Loomis, Jack M., & Beall, Andrew C. (2004). Does the Quality of the Computer Graphics Matter when Judging Distances in Visually Immersive Environments? *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 13(5), 560-571. doi: 10.1162/1054746042545292
- Treisman, A. M. (1960). Contextual cues in selective listening. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 12(4), 242-248.
- Trotter, Yves, Celebrini, Simona, Stricanne, Brigitte, Thorpe, Simon, & Imbert, Michel. (1992). Modulation of neural stereoscopic processing in primate area V1 by the viewing distance. *Science*, 257(5074), 1279-1281.
- Viemeister, NF. (1970). Intensity discrilnination: Performance in three paradigms. *Perception & Psychophysics*, 8(6), 417-419.
- von Helmholtz, H. (1867). *Treatise on Physiological Optics*. New York: Dover. (First published in 1867, Leipzig: Voss).
- Von Hofsten, Claes. (1976). The role of convergence in visual space perception. *Vision Research*, 16(2), 193-198. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(76\)90098-5](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(76)90098-5)
- Walthew, C., & Gilchrist, I. D. (2006). Target location probability effects in visual search: an effect of sequential dependencies. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 32(5), 1294-1301. doi: 10.1037/0096-1523.32.5.1294
- Wang, Rui, Zhang, Jun-Yun, Klein, Stanley A., Levi, Dennis M., & Yu, Cong. (2012). Task relevancy and demand modulate double-training enabled transfer of perceptual learning. *Vision Research*, 61(0), 33-38. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.visres.2011.07.019>

- Welchman, Andrew E., Harris, Julie M., & Brenner, Eli. (2009). Extra-retinal signals support the estimation of 3D motion. *Vision Research*, 49(7), 782-789. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.visres.2009.02.014>
- Westheimer, G. (1979a). Cooperative neural processes involved in stereoscopic acuity. *Experimental Brain Research*, 36(3), 585-597.
- Westheimer, G. (1979b). Scaling of visual acuity measurements. *Archives of ophthalmology*, 97(2), 327.
- Westheimer, G., & Tanzman, I J. (1956). Qualitative Depth Localization with Diplopic Images. *Journal of the Optical Society of America*, 46(2), 116-117.
- Westheimer, Gerald, & McKee, Suzanne P. (1977). Integration regions for visual hyperacuity. *Vision Research*, 17(1), 89-93.
- Wheatstone, C. (1838). Contributions to the physiology of vision.–Part the first. On some remarkable, and hitherto unobserved, phenomena of binocular vision. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, 128, 371-394.
- Wilcox, L. M., & Allison, R. S. (2009). Coarse-fine dichotomies in human stereopsis. *Vision Research*, 49(22), 2653-2665.
- Wismeijer, Dagmar A., & Erkelens, Casper J. (2009). The effect of changing size on vergence is mediated by changing disparity. *Journal of Vision*, 9(13). doi: 10.1167/9.13.12
- Wolfe, Jeremy M., & Franzel, Susan L. (1988). Binocularity and visual search. *Perception & Psychophysics*, 44(1), 81-93.
- Woo, G. C., & Sillanpaa, V. (1979). Absolute stereoscopic thresholds as measured by crossed and uncrossed disparities. *Am J Optom Physiol Opt*, 56(6), 350-355.
- Wright, W.K. (2006). Visual Development and Amblyopia. In W. K. Wright, Spiegel, H.P., and Thompson, L.S. (Ed.), *Handbook of Pediatric Strabismus and Amblyopia* (pp. 103-137). New York, USA: Springer.
- Wright, WD. (1951). The role of convergence in stereoscopic vision. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 64(4), 289-297.
- Xiao, L. Q., Zhang, Jun-Yun, Wang, R., Klein, S. A., Levi, D. M., & Yu, C. (2008). Complete transfer of perceptual learning across retinal locations enabled by double training. *Curr Biol*, 18(24), 1922-1926. doi: 10.1016/j.cub.2008.10.030
- Yamada, Tomohiko, Scheiman, Mitchell, & Mitchell, G. Lynn. (2008). A comparison of stereopsis testing between red/green targets and polarized targets in children with normal binocular vision. *Optometry - Journal of the American Optometric Association*, 79(3), 138-142. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optm.2007.05.013>
- Yeshurun, Yaffa, Carrasco, Marisa, & Maloney, Laurence T. (2008). Bias and sensitivity in two-interval forced choice procedures: Tests of the difference model. *Vision Research*, 48(17), 1837-1851.
- Yu, Cong, Klein, Stanley A., & Levi, Dennis M. (2004). Perceptual learning in contrast discrimination and the (minimal) role of context. *Journal of Vision*, 4(3). doi: 10.1167/4.3.4
- Zannoli, Marina. (2012). *Organisation de l'espace audiovisuel tridimensionnel*. Université René Descartes-Paris V.
- Zhang, Jun-Yun, Zhang, Gong-Liang, Xiao, Lu-Qi, Klein, Stanley A., Levi, Dennis M., & Yu, Cong. (2010). Rule-Based Learning Explains Visual Perceptual Learning and Its Specificity and Transfer. *The Journal of Neuroscience*, 30(37), 12323-12328. doi: 10.1523/jneurosci.0704-10.2010
- Zhang, Ting, Xiao, Lu-Qi, Klein, Stanley A., Levi, Dennis M., & Yu, Cong. (2010). Decoupling location specificity from perceptual learning of orientation discrimination. *Vision Research*, 50(4), 368-374. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.visres.2009.08.024>
- Zinn, Walter J, & Solomon, Herbert. (1985). A comparison of static and dynamic stereoacuity. *Journal of the American Optometric Association*.

ADDITIONAL BIBLIOGRAPHY (MENDELEY)

- Algaze, A., Roberts, C., Leguire, L., Schmalbrock, P., & Rogers, G. (2002). Functional magnetic resonance imaging as a tool for investigating amblyopia in the human visual cortex: A pilot study. *Journal of American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus*, 6(5), 300–308. doi:10.1067/mpa.2002.124902
- Andalib, D., Nabie, R., & Poormohammad, B. (2015). Factors Affecting Improvement of Stereopsis Following Successful Surgical Correction of Childhood Strabismus in Adults. *Strabismus*, 23(2), 80–4. doi:10.3109/09273972.2015.1025985
- Anderson, S. J., & Swettenham, J. B. (2006). Neuroimaging in human amblyopia. *Strabismus*, 14(1), 21–35. doi:10.1080/09273970500538082
- Archie, K. A., & Mel, B. W. (2000). A model for intradendritic computation of binocular disparity. *Nature Neuroscience*, 3(1), 54–63. doi:10.1038/71125
- Astle, A. T., McGraw, P. V., & Webb, B. S. (2011). Recovery of stereo acuity in adults with amblyopia. *BMJ Case Reports*, 2011(feb21_2), bcr0720103143–. doi:10.1136/bcr.07.2010.3143
- Backus, B. T., & Matza-Brown, D. (2003). The contribution of vergence change to the measurement of relative disparity. *J Vis*, 3(11).
- Badcock, D. R., & Schor, C. M. (1985). Depth-increment detection function for individual spatial channels. *Journal of the Optical Society of America*, 2(7), 1211–1215.
- Barnes, G. R., Hess, R. F., Dumoulin, S. O., Achtman, R. L., & Pike, G. B. (2001). The cortical deficit in humans with strabismic amblyopia. *The Journal of Physiology*, 533(1), 281–297. doi:10.1111/j.1469-7793.2001.0281b.x
- Barry, S. R. (2009). *Fixing My Gaze: a Scientist's Journey into Seeing in Three Dimensions*. New York: Basic Books.
- Birch, E., Williams, C., Drover, J., Fu, V., Cheng, C., Northstone, K., ... Adams, R. (2008). Randot Preschool Stereoacuity Test: normative data and validity. *Journal of AAPOS: The Official Publication of the American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus / American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus*, 12(1), 23–6. doi:10.1016/j.jaapos.2007.06.003
- Birch, E., Williams, C., Hunter, J., & Lapa, M. C. (1997). Random dot stereoacuity of preschool children. ALSPAC “Children in Focus” Study Team. *Journal of Pediatric Ophthalmology and Strabismus*, 34(4), 217–22; quiz 247–8. Retrieved from <http://europepmc.org/abstract/med/9253735>
- Blake, R., & Cormack, R. (1979). Psychophysical evidence for a monocular visual cortex in stereoblind humans. *Science*, 203(4377), 274–275. doi:10.1126/science.760194
- Blakemore, C. (1970). The range and scope of binocular depth discrimination in man. *The Journal of Physiology*, 211(3), 599–622. Retrieved from <http://europepmc.org/abstract/MED/5501054>
- Brenner, E., & Van Damme, W. J. M. (1998). Judging distance from ocular convergence. *Vision Res*, 38(4), 493–498.

- Bridgeman, B. (2014). Restoring adult stereopsis: a vision researcher's personal experience. *Optometry and Vision Science, 91*(6), e135–9. doi:10.1097/OPX.0000000000000272
- Brooks, K. R., & Stone, L. S. (2004). Stereomotion speed perception: Contributions from both changing disparity and interocular velocity difference over a range of relative disparities. *Journal of Vision, 4*(12). doi:10.1167/4.12.6
- Carrasco, M., Ling, S., & Read, S. (2004). Attention alters appearance. *Nat Neurosci, 7*(3), 308–313. doi:10.1038/nn1194
- Caziot, B., & Backus, B. T. (2015). Stereoscopic Offset Makes Objects Easier to Recognize. *PloS One, 10*(6), e0129101. doi:10.1371/journal.pone.0129101
- Caziot, B., Valsecchi, M., Gegenfurtner, K. R., & Backus, B. T. (2014). Fast perception of binocular disparity. *Journal of Vision, 14*(15), 25–25. doi:10.1167/14.15.25
- Chang, D. H. F., Mevorach, C., Kourtzi, Z., & Welchman, A. E. (2014). Training Transfers the Limits on Perception from Parietal to Ventral Cortex. *Current Biology, 24*(20), 2445–2450. doi:10.1016/j.cub.2014.08.058
- Clarke, W. N., & Noel, L. P. (1990). Stereoacuity testing in the monofixation syndrome. *Journal of Pediatric Ophthalmology and Strabismus, 27*(3), 161–3. Retrieved from <http://europepmc.org/abstract/MED/2366128>
- Clavagnier, S., Dumoulin, S. O., & Hess, R. F. (2014). Is the Cortical Magnification reduced for the amblyopic eye? *Journal of Vision, 14*(10), 693–693. doi:10.1167/14.10.693
- Cottareau, B. R., McKee, S. P., Ales, J. M., & Norcia, A. M. (2012). Disparity-specific spatial interactions: evidence from EEG source imaging. *The Journal of Neuroscience : The Official Journal of the Society for Neuroscience, 32*(3), 826–40. doi:10.1523/JNEUROSCI.2709-11.2012
- Cottareau, B. R., McKee, S. P., & Norcia, A. M. (2012). Bridging the gap: global disparity processing in the human visual cortex. *Journal of Neurophysiology, 107*(9), 2421–2429.
- Coutant, B. E., & Westheimer, G. (1993). Population distribution of stereoscopic ability. *Ophthalmic and Physiological Optics, 13*(1), 3–7. doi:10.1111/j.1475-1313.1993.tb00419.x
- Cowey, A., & Wilkinson, F. (1991). The role of the corpus callosum and extra striate visual areas in stereoacuity in Macaque monkeys. *Neuropsychologia, 29*(6), 465–479. doi:10.1016/0028-3932(91)90005-S
- Cumming, B. G., & Parker, A. J. (1997). Responses of primary visual cortical neurons to binocular disparity without depth perception, *389*(6648), 280–283. doi:10.1038/38487
- Cumming, B. G., & Parker, A. J. (1999). Binocular neurons in V1 of awake monkeys are selective for absolute, not relative, disparity. *The Journal of Neuroscience*. Retrieved from <http://www.jneurosci.org/content/19/13/5602.short>
- Cumming, B. G., & Parker, A. J. (2000). Local Disparity Not Perceived Depth Is Signaled by Binocular Neurons in Cortical Area V1 of the Macaque. *J. Neurosci., 20*(12), 4758–4767. Retrieved from <http://www.jneurosci.org/content/20/12/4758.short>

- Dengler, B., & Kommerell, G. (1993). Stereoscopic cooperation between the fovea of one eye and the periphery of the other eye at large disparities Implications for anomalous retinal correspondence in strabismus. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 231(4), 199–206. doi:10.1007/BF00918841
- Ding, J., Klein, S. A., & Levi, D. M. (2013). Binocular combination in abnormal binocular vision. *Journal of Vision*, 13(2), 14. doi:10.1167/13.2.14
- Ding, J., & Levi, D. M. (2011). Recovery of stereopsis through perceptual learning in human adults with abnormal binocular vision. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(37), E733–41. doi:10.1073/pnas.1105183108
- Ding, J., & Sperling, G. (2006). A gain-control theory of binocular combination. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 103(4), 1141–1146. doi:10.1073/pnas.0509629103
- Dorn, L., & Petrinović-Dorešić, J. (2007). Stereoscopic Visual Acuity in Different Types of Amblyopia. *Acta Clinica Croatica*, 46(1-Supplement 1), 63–70. Retrieved from http://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak&id_clanak_jezik=21959
- Dye, M. W. G., Green, C. S., & Bavelier, D. (2009). Increasing Speed of Processing With Action Video Games. *Current Directions in Psychological Science*, 18(6), 321–326. doi:10.1111/j.1467-8721.2009.01660.x
- Elflein, H. M., Fresenius, S., Lamparter, J., Pitz, S., Pfeiffer, N., Binder, H., ... Mirshahi, A. (2015). The prevalence of amblyopia in Germany: data from the prospective, population-based gutenber health study. *Deutsches Ärzteblatt International*, 112(19), 338–44. doi:10.3238/arztebl.2015.0338
- Entzinger, J. O. (2009, March 1). The Role of Binocular Cues in Human Pilot Landing Control. The Thirteenth Australian International Aerospace Congress. Retrieved from <http://repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/dspace/handle/2261/33383>
- Ericsson, K. A. (2013). Why expert performance is special and cannot be extrapolated from studies of performance in the general population: A response to criticisms. *Intelligence*. doi:10.1016/j.intell.2013.12.001
- Erkelens, C. J., & Collewijn, H. (1985a). Eye movements and stereopsis during dichoptic viewing of moving random-dot stereograms. *Vision Research*, 25(11), 1689–1700. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(85\)90141-5](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(85)90141-5)
- Erkelens, C. J., & Collewijn, H. (1985b). Motion perception during dichoptic viewing of moving random-dot stereograms. *Vision Research*, 25(4), 583–588. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(85\)90164-6](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(85)90164-6)
- Farell, B., Li, S., & McKee, S. P. (2004). Disparity increment thresholds for gratings. *Journal of Vision*, 4(3).
- Farivar, R., Thompson, B., Mansouri, B., & Hess, R. F. (2011). Interocular suppression in strabismic amblyopia results in an attenuated and delayed hemodynamic response function in early visual cortex. *Journal of Vision*, 11(14), 16–. doi:10.1167/11.14.16

- Fawcett, S. L. (2005). An evaluation of the agreement between contour-based circles and random dot-based near stereoacuity tests. *American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus*, 9(6), 572–8. doi:10.1016/j.jaapos.2005.06.006
- Fawcett, S. L., & Birch, E. E. (2003). Validity of the Titmus and Randot circles tasks in children with known binocular vision disorders. *Journal of AAPOS : The Official Publication of the American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus / American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus*, 7(5), 333–8. doi:10.1016/S1091853103001708
- Feinberg, R., & Reuel, S. (1961, December 5). Device for testing visual acuity. Retrieved from <https://www.google.com/patents/US3011394>
- Fendick, M., & Westheimer, G. (1983). Effects of practice and the separation of test targets on foveal and peripheral stereoacuity. *Vision Research*, 23(2), 145–150. doi:10.1016/0042-6989(83)90137-2
- Fielder, A. R., & Moseley, M. J. (1996). Does stereopsis matter in humans? *Eye (London, England)*, 10 (Pt 2)(2), 233–8. doi:10.1038/eye.1996.51
- Finlay, D. C., Manning, M. L., Dunlop, D. P., & Dewis, S. A. M. (1989). Difficulties in the definition of “stereoscotoma” using temporal detection of thresholds of dynamic random dot stereograms. *Documenta Ophthalmologica*, 72(2), 161–173. doi:10.1007/BF00156706
- Flom, M. C., & Neumaier, R. W. (1966). Prevalence of amblyopia. *Public Health Reports*, 81(4), 329–41. Retrieved from <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1919787&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>
- Foley, J. M., & Richards, W. (1972). Effects of voluntary eye movement and convergence on the binocular appreciation of depth. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 11(6), 423–427.
- Fricke, T. R., & Siderov, J. (1997). Stereopsis, stereotests, and their relation to vision screening and clinical practice. *Clinical and Experimental Optometry*, 80(5), 165–172. doi:10.1111/j.1444-0938.1997.tb04876.x
- Fricke, T., & Siderov, J. (1997). Non-stereoscopic cues in the Random-Dot E stereotest: results for adult observers. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 17(2), 122–127. doi:10.1046/j.1475-1313.1997.96000713.x
- Frisby, J. (1980). The Frisby stereotest: amended instructions. *British Orthoptics Journal*, 37(108).
- Frisby, J. P., & Clatworthy, J. L. (1975). Learning to see complex random-dot stereograms. *Perception*, 4(2), 173–178. doi:10.1068/p040173
- Frisby, J. P., Davis, H., & Edgar, R. (2003). Does interpupillary distance predict stereoacuity for normal observers? *Perception ECVF Abstract*, 32. doi:10.1068/v030975
- Granic, I., Lobel, A., & Engels, R. C. M. E. (2014). The benefits of playing video games. *The American Psychologist*, 69(1), 66–78. doi:10.1037/a0034857
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2006). The cognitive neuroscience of video games. In P. Messaris & L. Humphreys (Eds.), *Digital media: Transformations in human communication* (pp. 211–223). New York: Peter Lang.

- Green, C. S., & Bavelier, D. (2012). Learning, attentional control, and action video games. *Current Biology*, 22(6), R197–206. doi:10.1016/j.cub.2012.02.012
- Greenlee, M., & Magnussen, S. (1987). Saturation of the tilt aftereffect. *Vision Research*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0042698987900174>
- Harwerth, R. S., Fredenburg, P. M., & Smith, E. L. (2003). Temporal integration for stereoscopic vision. *Vision Research*, 43(5), 505–517. doi:10.1016/S0042-6989(02)00653-3
- Henson, D. B., & Williams, D. E. (1980). Depth perception in strabismus. *British Journal of Ophthalmology*, 64(5), 349–353. doi:10.1136/bjo.64.5.349
- Hess, R. F., & Wilcox, L. M. (1994). Linear and non-linear filtering in stereopsis. *Vision Research*, 34(18), 2431–2438.
- Hess, R. F., & Wilcox, L. M. (2008). The transient nature of 2nd-order stereopsis. *Vision Res*, 48, 1327–1334.
- Hochberg, J. E., & McAlister, E. (1955). Relative Size vs. Familiar Size in the Perception of Represented Depth. *The American Journal of Psychology*, 68(2), 294–296. doi:10.2307/1418903
- Howard, I. (2012). *Perceiving in Depth, Volume 1: Basic Mechanisms*.
- Howard, I. P., & Rogers, B. J. (2012). *Perceiving in Depth, Volume 2: Stereoscopic Vision*.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *The Journal of Physiology*, 160(1), 106–154.
- Hubel, D. H., Wiesel, T. N., Yeagle, E. M., Lafer-Sousa, R., & Conway, B. R. (2013). Binocular Stereopsis in Visual Areas V-2, V-3, and V-3A of the Macaque Monkey. *Cerebral Cortex*. doi:10.1093/cercor/bht288
- Järvenpää, T., & Salmimaa, M. (2008). Optical characterization of autostereoscopic 3-D displays. *Journal of the Society for Information Display*, 16(8), 825–833. doi:10.1889/1.2966444
- Jones, R. (1977). Anomalies of disparity detection in the human visual system. *The Journal of Physiology*, 264(3), 621–640. Retrieved from <http://jp.physoc.org/content/264/3/621.abstract>
- Jones, R. K., & Lee, D. N. (n.d.). Why two eyes are better than one: The two views of binocular vision.
- Jurcoane, A., Choubey, B., Mitsieva, D., Muckli, L., & Sireteanu, R. (2009). Interocular transfer of orientation-specific fMRI adaptation reveals amblyopia-related deficits in humans. *Vision Research*, 49(13), 1681–92. doi:10.1016/j.visres.2009.04.009
- Kejian, S., & Fei, W. (2010). The development of stereoscopic display technology. *Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE), 2010 3rd International Conference on*. doi:10.1109/ICACTE.2010.5579814
- Kitaoji, H., & Toyama, K. (1987). Preservation of position and motion stereopsis in strabismic subjects. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 28(8), 1260–1267. Retrieved from <http://iovs.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2160004>

- Krauskopf, J., Cornsweet, T. N., & Riggs, L. a. (1960). Analysis of eye movements during monocular and binocular fixation. *Journal of the Optical Society of America*, 50(6), 572–8. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14411808>
- Kuang, T.-M., Hsu, W.-M., Chou, C.-K., Tsai, S.-Y., & Chou, P. (2005). Impact of stereopsis on quality of life. *Eye (London, England)*, 19(5), 540–5. doi:10.1038/sj.eye.6701538
- Kulp, M. T., Cotter, S. A., Connor, A. J., & Clarke, M. P. (2014). Should amblyopia be treated? *Ophthalmic & Physiological Optics : The Journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)*, 34(2), 226–32. doi:10.1111/opo.12124
- Kwee, I. L., Fujii, Y., Matsuzawa, H., & Nakada, T. (1999). Perceptual Processing of Stereopsis in Humans: High-Field (3.0-Tesla) Functional MRI Study. *Neurology*, 53(7), 1599. Retrieved from <http://www.neurology.org/content/53/7/1599>
- Lang, J. (1983). A new stereotest. *Journal of Pediatric Ophthalmology and Strabismus*, 20(2), 72–4. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/6864421>
- Langley, K., Fleet, D. J., & Hibbard, P. B. (1999). Stereopsis from contrast envelopes. *Vision Res*, 39(14), 2313–2324.
- Lasley, D. J., Kivlin, J., Rich, L., & Flynn, J. T. (1984). Stereo-discrimination between diplopic images in clinically normal observers. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 25(11), 1316–1320.
- Law, P. C. F., Paton, B. K., Thomson, R. H., Liu, G. B., Miller, S. M., & Ngo, T. T. (2013). Dichoptic viewing methods for binocular rivalry research: prospects for large-scale clinical and genetic studies. *Twin Research and Human Genetics : The Official Journal of the International Society for Twin Studies*, 16(6), 1033–78. doi:10.1017/thg.2013.76
- Leske, D. A., Birch, E. E., & Holmes, J. M. (2006). Real depth vs randot stereotests. *American Journal of Ophthalmology*, 142(4), 699–701. doi:10.1016/j.ajo.2006.04.065
- Levi, D. M., Knill, D. C., & Bavelier, D. (2015). Stereopsis and amblyopia: A mini-review. *Vision Research*. doi:10.1016/j.visres.2015.01.002
- Levy, N. S., & Glick, E. B. (1974). Stereoscopic perception and Snellen visual acuity. *American Journal of Ophthalmology*, 78(4), 722–4. Retrieved from <http://europepmc.org/abstract/MED/4415892>
- Lim Lee, Y., & Saunders, J. A. (2011). Stereo improves 3D shape discrimination even when rich monocular shape cues are available. *J Vis*, 11(9). doi:10.1167/11.9.6
- Maag, U., Vanasse, C., Dionne, G., & Laberge-Nadeau, C. (1997). Taxi drivers' accidents: how binocular vision problems are related to their rate and severity in terms of the number of victims. *Accident; Analysis and Prevention*, 29(2), 217–24. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9088361>
- Magnussen, S., & Kurtenbach, W. (1980). Linear summation of tilt illusion and tilt aftereffect. *Vision Res*, 20(1), 39–42. doi:10.1016/0042-6989(80)90139-X
- Mamassian, P., Knill, D. C., & Kersten, D. (1998). The perception of cast shadows. *Trends in Cognitive Science*, 2(8), 288–295.

- Manny, R. E., Martinez, A. T., & Fern, K. D. (1991). Testing stereopsis in the preschool child: is it clinically useful? *Journal of Pediatric Ophthalmology and Strabismus*, 28(4), 223–31. Retrieved from <http://europepmc.org/abstract/med/1919971>
- Marshall, J. A., Burbeck, C. A., Ariely, D., Rolland, J. P., & Martin, K. E. (1996). Occlusion edge blur: a cue to relative visual depth. *Journal of the Optical Society of America A*, 13(4), 681. doi:10.1364/JOSAA.13.000681
- Masson, G. S., Busetini, C., & Miles, F. a. (1997). Vergence eye movements in response to binocular disparity without depth perception. *Nature*, 389(6648), 283–286. doi:10.1038/38496
- Mazyn, L. I. N., Lenoir, M., Montagne, G., & Savelsbergh, G. J. P. (2004). The contribution of stereo vision to one-handed catching. *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation Cérébrale*, 157(3), 383–90. doi:10.1007/s00221-004-1926-x
- McColl, S. L., Ziegler, L., & Hess, R. F. (2000). Stereodeficient subjects demonstrate non-linear stereopsis. *Vision Res*, 40(9), 1167–1177. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10738075>
- McKee, S. P. (1983). The spatial requirements for fine stereoacuity. *Vision Research*, 23(2), 191–198. doi:10.1016/0042-6989(83)90142-6
- McKee, S. P., & Levi, D. M. (1987). Dichoptic hyperacuity: the precision of nonius alignment. *Journal of the Optical Society of America*, 4(6), 1104–1108.
- McKee, S. P., Levi, D. M., & Bowne, S. F. (1990). The imprecision of stereopsis. *Vision Research*, 30(11), 1763–1779. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(90\)90158-H](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(90)90158-H)
- McKee, S. P., & Taylor, D. G. (2010). The precision of binocular and monocular depth judgments in natural settings. *Journal of Vision*, 10(10), 5. doi:10.1167/10.10.5
- McKee, S. P., Welch, L., Taylor, D. G., & Bowne, S. F. (1990). Finding the common bond: Stereoacuity and the other hyperacuities. *Vision Research*, 30(6), 879–891.
- Mel, B. W., Ruderman, D. L., & Archie, K. A. (1998). Toward a Single-Cell Account of Binocular Disparity Tuning. In M. I. Jordan, M. J. Kearns, & S. A. Solla (Eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems 10: Proceedings of the 1997 Conference* (Vol. 8, p. 1089). Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=M55BL-GvQ8IC&pgis=1>
- Melmoth, D. R., Finlay, A. L., Morgan, M. J., & Grant, S. (2009). Grasping deficits and adaptations in adults with stereo vision losses. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 50(8), 3711–20. doi:10.1167/iovs.08-3229
- Micoulaud-Franchi, J.-A., Fond, G., & Dumas, G. (2013). Cyborg psychiatry to ensure agency and autonomy in mental disorders. A proposal for neuromodulation therapeutics. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 463. doi:10.3389/fnhum.2013.00463
- Mittenberg, W. (2000). Stereoscopic Visual Impairment in Vascular Dementia. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 15(7), 561–569. doi:10.1016/S0887-6177(99)00045-1
- Murphy, A. P., Ban, H., & Welchman, A. E. (2013). Integration of texture and disparity cues to surface slant in dorsal visual cortex. *Journal of Neurophysiology*, 110(1), 190–203. doi:10.1152/jn.01055.2012

- Nefs, H. T., & Harris, J. (2007). Vergence effects on the perception of motion-in-depth. *Experimental Brain Research*, 183(3), 313–322. doi:10.1007/s00221-007-1046-5
- Nefs, H. T., & Harris, J. M. (2008). Induced motion in depth and the effects of vergence eye movements. *Journal of Vision*, 8(3), 8.1–16. doi:10.1167/8.3.8
- Nefs, H. T., & Harris, J. M. (2010). What visual information is used for stereoscopic depth displacement discrimination? *Perception*, 39(6), 727–744. doi:10.1068/p6284
- Nefs, H. T., O'Hare, L., & Harris, J. M. (2010). Two independent mechanisms for motion-in-depth perception: evidence from individual differences. *Frontiers in Psychology*, 1, 155. doi:10.3389/fpsyg.2010.00155
- Neri, P. (2005). A stereoscopic look at visual cortex. *Journal of Neurophysiology*, (93), 1823–1826. Retrieved from http://139.127.252.17/jclub/20050808/neri_2005.pdf
- Neri, P., Bridge, H., & Heeger, D. J. (2004). Stereoscopic processing of absolute and relative disparity in human visual cortex. *Journal of Neurophysiology*, 92(3), 1880–1891.
- Ninio, J., & Herlin, I. (1988). Speed and accuracy of 3d interpretation of linear stereograms. *Vision Res*, 28(11), 1223–1233. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(88\)90038-7](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(88)90038-7)
- Nishida, Y., Hayashi, O., Iwami, T., Kimura, M., Kani, K., Ito, R., ... Suzuki, M. (2001). Stereopsis-processing regions in the human parieto-occipital cortex. *Neuroreport*, 12(10).
- Nüssgens, Z., Czerwonka, B., & Roggenkämper, P. (1993). Examinations on the New Lang Test. *Strabis*, 1(2), 69–73. Retrieved from <http://informahealthcare.com/doi/abs/10.3109/09273979309087720>
- Ohlsson, J., Villarreal, G., Abrahamsson, M., Cavazos, H., Sjöström, A., & Sjöstrand, J. (2001). Screening merits of the Lang II, Frisby, Randot, Titmus, and TNO stereo tests. *Journal of American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus*, 5(5), 316–322. doi:<http://dx.doi.org/10.1067/mpa.2001.118669>
- Ohzawa, I., DeAngelis, G., & Freeman, R. (1990). Stereoscopic depth discrimination in the visual cortex: neurons ideally suited as disparity detectors. *Science*, 249(4972), 1037–1041. doi:10.1126/science.2396096
- Oppenheimer, D. M., Meyvis, T., & Davidenko, N. (2009). Instructional manipulation checks: Detecting satisficing to increase statistical power. *Journal of Experimental Social Psychology*, 45(4), 867–872. doi:10.1016/j.jesp.2009.03.009
- Parker, A. J. (2007). Binocular depth perception and the cerebral cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(5), 379–391.
- Patterson, R., Cayko, R., Short, G. L., Flanagan, R., Moe, L., Taylor, E., & Day, P. (1995). Temporal integration differences between crossed and uncrossed stereoscopic mechanisms. *Perception & Psychophysics*, 57(6), 891–897. doi:10.3758/BF03206803
- Patterson, R., & Fox, R. (1984). The effect of testing method on stereoanomaly. *Vision Research*, 24(5), 403–408. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989\(84\)90038-5](http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(84)90038-5)

- Pauwels, K., & VAN Hulle, M. M. (2012). Head-centric disparity and epipolar geometry estimation from a population of binocular energy neurons. *International Journal of Neural Systems*, 22(3), 1250007. doi:10.1142/S0129065712500074
- Peterson, C. H., Wensveen, J. M., & Harwerth, R. S. (2004). The relative effects of Gabor bandwidth and reference-test separation on stereopsis. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, 45(5), 4323-. Retrieved from <http://abstracts.iovs.org/cgi/content/abstract/45/5/4323>
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32(1), 3–25.
- Preston, T. J., Kourtzi, Z., & Welchman, A. E. (2009). Adaptive estimation of three-dimensional structure in the human brain. *The Journal of Neuroscience*, 29(6), 1688–98. doi:10.1523/JNEUROSCI.5021-08.2009
- Preston, T. J., Li, S., Kourtzi, Z., & Welchman, A. E. (2008). Multivoxel pattern selectivity for perceptually relevant binocular disparities in the human brain. *The Journal of Neuroscience*, 28(44), 11315–27. doi:10.1523/JNEUROSCI.2728-08.2008
- Prince, S. J. D., Pointon, A. D., Cumming, B. G., & Parker, A. J. (2000). The Precision of Single Neuron Responses in Cortical Area V1 during Stereoscopic Depth Judgments. *J. Neurosci.*, 20(9), 3387–3400. Retrieved from <http://www.jneurosci.org/content/20/9/3387.short>
- Rashbass, C., & Westheimer, G. (1961). Disjunctive eye movements. *The Journal of Physiology*, 159(2), 339–360.
- Read, J. C. A., Phillipson, G. P., & Glennerster, A. (2009). Latitude and longitude vertical disparities. *Journal of Vision*, 9(13), 1–37. doi:10.1167/9.13.11
- Regan, D., Erkelens, C. J., & Collewijn, H. (1986a). Necessary conditions for the perception of motion in depth. *Investigate Ophthalmology and Visual Science*, 27(4), 584–597. Retrieved from <http://www.iovs.org/content/27/4/584.abstract>
- Regan, D., Erkelens, C. J., & Collewijn, H. (1986b). Visual field defects for vergence eye movements and for stereomotion perception. *Investigate Ophthalmology and Visual Science*, 27(5), 806–819. Retrieved from <http://www.iovs.org/content/27/5/806.abstract>
- Reinecke, R. D., & Simons, K. (1974). A new stereoscopic test for amblyopia screening. *American Journal of Ophthalmology*, 78(4), 714–21. Retrieved from <http://europepmc.org/abstract/MED/4411696>
- Richards, W. (1970). Stereopsis and stereoblindness. *Experimental Brain Research*, 10(4), 380–388.
- Richards, W. (1971). Anomalous Stereoscopic Depth Perception. *Journal of the Optical Society of America*, 61(3), 410–414. Retrieved from <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=josa-61-3-410>
- Richards, W., & Regan, D. (1973). A Stereo Field Map with Implications for Disparity Processing. *Investigate Ophthalmology and Visual Science*, 12(12), 904–909. Retrieved from <http://www.iovs.org/content/12/12/904.short>

- Roe, A. W., Parker, A. J., Born, R. T., & DeAngelis, G. C. (2007). Disparity channels in early vision. *The Journal of Neuroscience : The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 27(44), 11820–11831. doi:10.1523/JNEUROSCI.4164-07.2007
- Rogers, B. J., & Bradshaw, M. F. (1993). Vertical disparities, differential perspective and binocular stereopsis. *Nature*, 361, 253–255.
- Sachsenweger, M., & Sachsenweger, U. (1991). Stereoscopic acuity in ocular pursuit of moving objects. Dynamic stereoscopy and movement parallax: relevance to road safety and occupational medicine. *Documenta Ophthalmologica. Advances in Ophthalmology*, 78(1-2), 1–133. Retrieved from http://www.safetylit.org/citations/index.php?fuseaction=citations.viewdetails&citationIds%5B%5D=citjournalarticle_141123_6
- Sacks, O. (2006). A Neurobiologist's Notebook: "Stereo Sue." *The New Yorker*. Retrieved from http://dickatlee.com/misc/stereo_sue.pdf
- Sagi, D. (2011). Perceptual learning in Vision Research. *Vision Research*, 51(13), 1552–66. doi:10.1016/j.visres.2010.10.019
- Saint-Amour, D. (2004). Effective binocular integration at the midline requires the corpus callosum. *Neuropsychologia*, 42(2), 164–174. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2003.07.002
- Schaadt, A.-K., Schmidt, L., Reinhart, S., Adams, M., Garbacenkaitė, R., Leonhardt, E., ... Kerkhoff, G. (2013). Perceptual Relearning of Binocular Fusion and Stereoacuity After Brain Injury. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 1545968313516870–. doi:10.1177/1545968313516870
- Shafiee, D., Jafari, A. R., & Shafiee, A. A. (2014). Correlation between Interpupillary Distance and stereo acuity. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 3(12), 26–33. Retrieved from http://bepls.com/nov_2014/5.pdf
- Sheedy, J. E., Bailey, I. L., Buri, M., & Bass, E. (1986). Binocular vs. monocular task performance. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 63(10), 839–46. Retrieved from <http://europemc.org/abstract/med/3777115>
- Shortess, G. K., & Krauskopf, J. (1961). Role of involuntary eye movements in stereoscopic acuity. *Journal of the Optical Society of America*, 51(5), 555–559.
- Siderov, J., & Harwerth, R. S. (1993). Precision of stereoscopic depth perception from double images. *Vision Res*, 33(11), 1553–1560. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(93)90148-P
- Siderov, J., & Harwerth, R. S. (1995). Stereopsis, spatial frequency and retinal eccentricity. *Vision Research*, 35(16), 2329–2337. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(94)00307-8
- Simons, K., & Reinecke, R. D. (1974). A reconsideration of amblyopia screening and stereopsis. *American Journal of Ophthalmology*, 78(4), 707–13. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4411731>
- Spiegel, D. P. (2013). Transcranial direct current stimulation of the healthy and amblyopic visual cortex: mechanisms and action. ResearchSpace@Auckland. Retrieved from <https://researchspace.auckland.ac.nz/handle/2292/20570>

- Spiegel, D. P., Byblow, W. D., Hess, R. F., & Thompson, B. (2013). Anodal transcranial direct current stimulation transiently improves contrast sensitivity and normalizes visual cortex activation in individuals with amblyopia. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 27(8), 760–9. doi:10.1177/1545968313491006
- Spiegel, D. P., Hess, R. F., Byblow, W. D., & Thompson, B. (2012). Transcranial Direct Current Stimulation of the Visual Cortex in Adults with Amblyopia. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 53(14), 3894. Retrieved from <http://iovs.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2355861>
- Spiegel, D. P., Li, J., Hess, R., Byblow, W., To, L., Cooperstock, J., ... Thompson, B. (2013). Anodal tDCS Enhances the Effect of Binocular Therapy on Stereopsis in Adults with Amblyopia. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 54(15), 4983. Retrieved from <http://iovs.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2149896>
- Spiegel, D. P., Li, J., Hess, R. F., Byblow, W. D., Deng, D., Yu, M., & Thompson, B. (2013). Transcranial direct current stimulation enhances recovery of stereopsis in adults with amblyopia. *Neurotherapeutics: The Journal of the American Society for Experimental NeuroTherapeutics*, 10(4), 831–9. doi:10.1007/s13311-013-0200-y
- Stewart, C. E., Fielder, A., Stephens, D., & Moseley, M. (2002). Design of the Monitored Occlusion Treatment of Amblyopia Study (MOTAS). *British Journal of Ophthalmology*, 86(8), 915–919. doi:10.1136/bjo.86.8.915
- Syrimi, M., & Ali, N. (2015). The role of stereopsis (three-dimensional vision) in dentistry: review of the current literature. *British Dental Journal*, 218(10), 597–8. doi:10.1038/sj.bdj.2015.387
- Tam, W. J., & Stelmach, L. B. (1998). Display duration and stereoscopic depth discrimination. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, 52(1).
- Thomas, O. M., Cumming, B. G., & Parker, A. J. (2002). A specialization for relative disparity in V2. *Nature Neuroscience*, 5(5), 472–8. doi:10.1038/nn837
- Ukwade, M. T., Bedell, H. E., & Harwerth, R. S. (2003a). Stereopsis is perturbed by vergence error. *Vision Research*, 43(2), 181–193. doi:10.1016/S0042-6989(02)00408-X
- Ukwade, M. T., Bedell, H. E., & Harwerth, R. S. (2003b). Stereothresholds with simulated vergence variability and constant error. *Vision Research*, 43(2), 195–204. doi:10.1016/S0042-6989(02)00409-1
- Vaegan, T., & Taylor, D. (1979). Critical period for deprivation amblyopia in children. *Transactions of the Ophthalmological Societies of the United Kingdom*, 99(3), 432–9. Retrieved from <http://europemc.org/abstract/MED/298827>
- Van Ee, R., & Erkelens, C. J. (2010). Stereo-Vision: Head-Centric Coding of Retinal Signals. *Current Biology*, 20(13), R567–R568. doi:10.1016/j.cub.2010.05.001
- Vedamurthy, I., Nahum, M., Bavelier, D., & Levi, D. M. (2015). Mechanisms of recovery of visual function in adult amblyopia through a tailored action video game. *Scientific Reports*, 5, 8482. doi:10.1038/srep08482

- Walraven, J. (1975). Amblyopia Screening with Random-Dot Stereograms. *American Journal of Ophthalmology*, 80(5), 893–900. doi:10.1016/0002-9394(75)90286-X
- Wang, H., Chen, B., & Chow, S.-C. (2003). Sample size determination based on rank tests in clinical trials. *Journal of Biopharmaceutical Statistics*, 13(4), 735–51. doi:10.1081/BIP-120024206
- Wang, J., Hatt, S. R., O'Connor, A. R., Drover, J. R., Adams, R., Birch, E. E., & Holmes, J. M. (2010). Final version of the Distance Randot Stereotest: normative data, reliability, and validity. *Journal of AAPOS: The Official Publication of the American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus / American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus*, 14(2), 142–6. doi:10.1016/j.jaapos.2009.12.159
- Watanabe, Y., Kezuka, T., Harasawa, K., Usui, M., Yaguchi, H., & Shioiri, S. (2008). A new method for assessing motion-in-depth perception in strabismic patients. *The British Journal of Ophthalmology*, 92(1), 47–50. doi:10.1136/bjo.2007.117507
- Welch, R. B., Bridgeman, B., Anand, S., & Browman, K. E. (1993). Alternating prism exposure causes dual adaptation and generalization to a novel displacement. *Perception & Psychophysics*, 54(2), 195–204. doi:10.3758/BF03211756
- Welchman, A. E., Harris, J. M., & Brenner, E. (2009). Extra-retinal signals support the estimation of 3D motion. *Vision Research*, 49(7), 782–789. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.visres.2009.02.014
- Welchman, A. E., Preston, T., & Li, S. (2010). Functional specialisation for the perception of disparity-defined depth in the human visual cortex. In *Journal of Vision* (Vol. 8, pp. 541–541). Association for Research in Vision and Ophthalmology. doi:10.1167/8.6.541
- Westheimer, G. (1979). Cooperative neural processes involved in stereoscopic acuity. *Experimental Brain Research*, 36(3), 585–597.
- Westheimer, G. (2013). Clinical evaluation of stereopsis. *Vision Research*, 90, 38–42. doi:10.1016/j.visres.2012.10.005
- Westheimer, G., & McKee, S. (1980). Stereogram design for testing local stereopsis. *Investigate Ophthalmology and Visual Science*, 19(7), 802–809. Retrieved from <http://www.iovs.org/content/19/7/802.short>
- Westheimer, G., & Pettet, M. W. (1990). Contrast and duration of exposure differentially affect vernier and stereoscopic acuity. *Proceedings. Biological Sciences / The Royal Society*, 241(1300), 42–6. doi:10.1098/rspb.1990.0063
- Westheimer, G., & Tanzman, I. J. (1956). Qualitative Depth Localization with Diplopic Images. *Journal of the Optical Society of America*, 46(2), 116–117. Retrieved from <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=josa-46-2-116>
- Westheimer, G., & Truong, T. T. (1988). Target crowding in foveal and peripheral stereoacuity. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 65(5), 395–9. Retrieved from <http://europemc.org/abstract/med/3407726>
- Westlake, W. (2001). Is a one eyed racing driver safe to compete? Formula one (eye) or two? *The British Journal of Ophthalmology*, 85(5), 619–24. doi:10.1136/bjo.85.5.619

- Wilcox, L. M., & Allison, R. S. (2009). Coarse-fine dichotomies in human stereopsis. *Vision Res*, 49(22), 2653–2665.
- Woo, G. C., & Sillanpaa, V. (1979). Absolute stereoscopic thresholds as measured by crossed and uncrossed disparities. *Am J Optom Physiol Opt*, 56(6), 350–355.
- Wright, W. D. (1951). The role of convergence in stereoscopic vision. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 64(4), 289–297.
- Yamada, T., Scheiman, M., & Mitchell, G. L. (2008). A comparison of stereopsis testing between red/green targets and polarized targets in children with normal binocular vision. *Optometry - Journal of the American Optometric Association*, 79(3), 138–142.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.optm.2007.05.013>
- Zaroff, C. M., Knutelska, M., & Frumkes, T. E. (2003). Variation in Stereoacuity: Normative Description, Fixation Disparity, and the Roles of Aging and Gender. *Investigate Ophthalmology and Visual Science*, 44(2), 891–900. doi:10.1167/iovs.02-0361
- Zhang, Z.-L., Cantor, C. R. L., & Schor, C. M. (2010). *Perisaccadic Stereo Depth with Zero Retinal Disparity*. *Current Biology* (Vol. 20). Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982210007037>
- Zinn, W. J., & Solomon, H. (1985). A comparison of static and dynamic stereoacuity. *Journal of the American Optometric Association*.