



HAL
open science

Entre fusion et rivalité binoculaires : impact des caractéristiques des stimuli visuels lors de l'utilisation d'un système de réalité augmentée semi-transparent monoculaire

Elodie Bayle

► **To cite this version:**

Elodie Bayle. Entre fusion et rivalité binoculaires : impact des caractéristiques des stimuli visuels lors de l'utilisation d'un système de réalité augmentée semi-transparent monoculaire. Synthèse d'image et réalité virtuelle [cs.GR]. Université Paris-Saclay, 2021. Français. NNT : 2021UPASG029 . tel-04083124

HAL Id: tel-04083124

<https://theses.hal.science/tel-04083124v1>

Submitted on 27 Apr 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Entre fusion et rivalité binoculaires :
Impact des caractéristiques des
stimuli visuels lors de l'utilisation
d'un système de réalité augmentée
semi-transparent monoculaire

Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay

École doctorale n° 580, Sciences et technologies de l'information et de la
communication (STIC)

Spécialité de doctorat : Traitement du signal et des images

Unité de recherche : Université Paris-Saclay, Univ Evry, IBISC, 91020, Evry-
Courcouronnes, France.

Référent : Université d'Évry Val d'Essonne

Thèse présentée et soutenue à Evry, le 12 avril 2021, par

Elodie BAYLE

Composition du Jury

Frédéric MERIENNE Professeur des universités, Arts et Métiers Paris Tech	Président
Pascal MAMASSIAN Directeur de recherche CNRS, ENS	Rapporteur & Examineur
Guillaume MOREAU Professeur des universités, IMT Atlantique	Rapporteur & Examineur
Samia BOUCHAFA-BRUNEAU Professeur des universités, UEVE	Examinatrice
Laure LEROY Maître de conférences des universités, Paris 8	Examinatrice
Antoine MORICE Maître de conférences des universités, AMU	Examineur
Justin PLANTIER Chercheur, IRBA	Directeur de thèse
Pascaline NEVEU Chercheuse, IRBA	Co-encadrante & Examinatrice
Sylvain HOURLIER Senior expert Human Factors, Thales AVS	Co-encadrant & Invité
Sylvie LELANDAIS-BONADE Professeur émérite, UEVE	Invitée

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier **Pascal Mamassian** et **Guillaume Moreau** qui ont accepté de rapporter mon travail. Je remercie également **Antoine Morice** et **Frédéric Merienne** pour leur participation à ce jury de thèse

Je remercie également l'entreprise **Thales AVS** qui a financé ce projet de thèse avec l'aide de l'ANRT. Merci aux collègues thalésiens avec qui j'ai apprécié échanger lors de mes passages furtifs.

Un grand merci à **l'Institut de Recherche Biomédicale des Armées (IRBA)** qui m'a chaleureusement accueilli et notamment le département **NSCo**, dirigé par **Françoise Darses**.

Je remercie également le laboratoire **Informatique Biologie Intégrative et Systèmes Complexes (IBISC)**, dirigé par **Samia Bouchafa-Bruneau**, qui a participé à la gestion administrative et scientifique de la thèse. Je la remercie également pour sa participation au jury de thèse.

Je n'ai jamais aimé les sports individuels. A l'image de mon passé sportif et de mes études STAPS, ce travail est pour moi le résultat d'un travail d'équipe.

Je remercie donc **Justin Plantier**, chef de l'unité Perception du département NSCo mais également mon directeur de thèse. Les discussions matinales quand l'Irba dort encore nous ont permis d'échanger sur de nombreux domaines. Grâce à vos remarques constructives et votre expérience, ce manuscrit a gagné en précision et mes connaissances se sont enrichies.

Je remercie également **Sylvain Hourlier**, co-encadrant et mon manager chez Thales AVS. Même si on ne s'est pas vu tous les jours, chaque rencontre était une bouffée de positivisme, de compliments et de conseils autour du monde de l'aéronautique et des IHM dont je n'étais pas tellement familière avant la signature de mon contrat CIFRE.

Je remercie également **Sylvie Lelandais-Bonadé**, qui a suivi ce travail et apporté son expérience.

Merci à **Laure Leroy**, tu n'es peut-être pas mon encadrante « principale » mais tu as su apporter un plus à ce travail via nos réflexions autour des études expérimentales mais également grâce à tes remarques toujours bienveillantes et tes conseils avisés.

Un grand merci à mon encadrante/mentor/partenaire/cat sitter et amie de cette aventure, **Pascaline Neveu**. J'ai énormément appris scientifiquement et surtout humainement à tes côtés. L'aboutissement de ce manuscrit en est la preuve. Je suis fière d'être la première de la longue liste de thésards chanceux qui t'auront pour encadrante et plus tard directrice de thèse. Ce n'est pas évident de se lancer dans un défi de 3 ans sans connaître ses encadrants d'un point de vue professionnel et personnel (ni sa doctorante

d'ailleurs). On a vite été sur la même longueur d'onde ce qui nous a facilité le travail. Excuse-moi si je mets ceinture et bretelle pour te remercier mais c'est pas deux fois l'an que j'ai l'occasion de le faire. Merci cheffe !

A l'IRBA j'y ai trouvé des collègues, des amis mais surtout un meilleur ami. Merci à toi **Charly** ! Une oreille attentive qui était toujours là pour m'écouter et une personne disponible pour échanger sur la vie tout simplement. Merci évidemment pour avoir programmé mes manip et pour ton aide sur la partie ingénieur de cette thèse qui n'aurait pas pu être ce qu'elle est sans toi.

Je remercie la team B12 a commencé par **Véro**, statisticienne en cheffe qui m'a permis de voir plus clair dans toutes ces données, ce qui n'a pas été une mince affaire, puis **Solenn, Franck, Marine, Cyril** et **David**. Je remercie également l'aile A de l'IRBA, un public toujours prêt à rire à mes blagues.

Merci à **Emilie** et **Estelle**, colocataires de bureau successives et bien plus.

Merci aux copines doctorantes **Laura, Mégane, Ophélie, Jessica** et à **Charles** avec qui nous avons monté ce projet de bureau des doctorants. En espérant qu'il perdure accompagné de soirées V&B évidemment.

Je remercie tous les participants des études expérimentales de ce travail de thèse.

Que serait une page de remerciement sans un clin d'œil à **mes parents** et **mes frères**. Je ne suis pas sûre que j'aurais fini de leur dire merci un jour tellement ils me permettent de m'épanouir en me soutenant quoi que je fasse. Je remercie également **ma grand-mère, mes grands-parents, oncles, tantes, cousins, cousines, petits cousins, petites cousines** qui je l'espère seront fières de moi et de mon parcours.

Merci enfin à **Camille** qui me soutient depuis le premier jour et surtout me supporte. Puisse mon prochain défi se faire à tes côtés, je n'y arriverai pas sans toi.

Table des matières

Remerciements.....	i
Table des matières	iii
Liste des figures	v
Liste des tableaux.....	ix
Introduction générale – Contexte applicatif.....	1
I. Principes des dispositifs de réalité augmentée semi-transparents.....	2
II. Historique des visuels de casque monoculaires dans l’aviation	7
III. Avantages et problématiques des visuels de casque monoculaires	9
Partie 1 : Etat de l’art	13
I. Fusion binoculaire	14
II. Rivalité binoculaire	21
III. Vision binoculaire et visuels de casque monoculaires	45
IV. Synthèse de l’état de l’art.....	57
V. Problématiques et hypothèses.....	59
Partie 2 : Études expérimentales.....	61
I. Évaluation des caractéristiques des stimuli visuels sur les performances (étude psychophysique).....	63
II. Evaluation de différents profils de pulsation	105
III. Evaluation des paramètres d’affichage en simulateur avec un dispositif de réalité augmentée monoculaire semi-transparent (étude écologique)	125
Discussion générale et perspectives	151
I. Introduction.....	151
II. Synthèse des résultats des trois études	151
III. Limites des études menées	156
IV. Apports des travaux au cadre théorique.....	157
V. Apports des travaux au cadre industriel	158
Conclusion.....	159
Références.....	161
Annexes.....	171

Liste des figures

Figure 1 : Continuum réalité-virtualité de Milgram et al. (1994)	1
Figure 2 : Dispositif de réalité augmentée de type <i>video-see-through</i>	2
Figure 3 : Dispositif de réalité augmentée de type <i>optical-see-through</i>	3
Figure 4 : Exemple de symbologie utilisée dans les aéronefs civils.....	4
Figure 5 : Champ binoculaire et champs monoculaires.....	4
Figure 6 : Comparaison de la symbologie dans les viseurs et visuels de casque	6
Figure 7 : Relation entre distance focale et champ de vision	6
Figure 8 : Visuels de casque monoculaires utilisés dans l'armée américaine	8
Figure 9 : Trajets des voies visuelles depuis la rétine.....	16
Figure 10 : Voies de traitement ventrale et dorsale	17
Figure 11 : Notions d'horoptère et aire de Panum.....	20
Figure 12 : Images dichoptiques, perception mixte et fusion anormale	22
Figure 13 : Exemple de stimuli complexes générant de la rivalité binoculaire	22
Figure 14 : Stimuli présentés dans l'étude de Wilson et al. (2001)	23
Figure 15 : Transition du renversement de la perception sous forme d'ondes	23
Figure 16 : Distributions gamma des durées de dominance	24
Figure 17 : Stimuli qui, affichés dans chaque œil, provoquent de la rivalité binoculaire.....	25
Figure 18 : Stimuli présentés dans l'étude Haynes et al. (2005)	29
Figure 19 : Résultats de l'IRMf obtenus dans l'étude de Haynes et al. (2005)	30
Figure 20 : Stimuli et résultats issus de l'étude d'O'Shea et al. (2013).....	31
Figure 21 : Potentiels évoqués mesurés par des électrodes placés sur le lobe occipital d'un sujet dans l'étude de Brown et Norcia (1997)	32
Figure 22 : Paires de stimuli de grande taille (6°x6°)	33
Figure 23 : Quatre paires différentes de stimuli : A) motifs orthogonaux, B) inclinaison bistable, C) maison-visage D) cube de Necker (Brascamp et al., 2005).....	34
Figure 24 : Stimuli générant de la rivalité monoculaire	35
Figure 25 : Stimuli présentés dans l'étude de Meng et Tong (2004).....	37
Figure 26 : Stimuli présentés dans l'étude d'Ooi et He (1999).....	37
Figure 27 : Stimuli utilisés dans l'étude de Chong et Blake (2006).....	38
Figure 28 : Procédure utilisée dans Mitchell et al. (2004) pour analyser l'impact de l'attention exogène sur la rivalité binoculaire	40
Figure 29 : Modèle générique de la rivalité binoculaire (Blake et O'Shea, 2017).....	42
Figure 30 : Modèle multi-niveaux de Tong et al. (2006).....	43
Figure 31 : Stimuli présentés dans l'étude de Blake et al. (1991).....	46
Figure 32 : Stimuli présentés dans l'étude de Blake et Boothroyd (1985).....	47
Figure 33 : Matrice 2 ³ des configurations évaluées dans l'étude de Laramé et Ware (2002)....	49
Figure 34 : Résultats de l'étude de Winterbottom et al. (2006).....	50

Figure 35 : Scène (gauche) et symbologie (droite) utilisées dans les études de Winterbottom et al. (2006 ; 2015).....	51
Figure 36 : Dispositif expérimental reproduisant un système de réalité augmentée monoculaire.....	68
Figure 37 : Oculomètre et lunettes actives.....	68
Figure 38 : Manette de jeu.....	69
Figure 39 : Images présentées à chaque œil.....	70
Figure 40 : Symbologie monoculaire sous forme d'anneau.....	71
Figure 41 : Caractéristiques du fond binoculaire et de la symbologie monoculaire.....	71
Figure 42 : Profil de la pulsation de la symbologie monoculaire avec un contraste maximal de 1.....	72
Figure 43 : Profil de la pulsation de la symbologie monoculaire avec un contraste maximal de 0,6.....	72
Figure 44 : Évènement présenté sous forme d'anneaux de Landolt.....	73
Figure 45 : Variables indépendantes évaluées : œil de présentation, paramètres du fond binoculaire et caractéristiques de la symbologie monoculaire.....	74
Figure 46 : Déroulement d'un essai.....	75
Figure 47 : Procédure des deux sessions.....	76
Figure 48 : Données oculométriques d'un participant pour un évènement.....	78
Figure 49 : Performance de suivi (erreur moyenne à la cible en minutes d'arc) en fonction des caractéristiques du fond binoculaire.....	83
Figure 50 : Performance de suivi (erreur moyenne à la cible en minutes d'arc) en fonction de la pulsation.....	83
Figure 51 : Temps moyens de détection (en ms) des évènements en fonction des caractéristiques du fond binoculaire.....	84
Figure 52 : Temps moyens de fixation (en ms) des évènements en fonction des caractéristiques du fond binoculaire.....	85
Figure 53 : Echelle d'optotypes en anneaux de Landolt permettant de mesurer l'acuité vision de loin.....	95
Figure 54 : Echelle d'optotypes morphoscopiques permettant de mesurer l'acuité vision de près.....	96
Figure 55 : Chemins optiques empruntés lors de l'utilisation d'un stéréoscope à miroirs.....	97
Figure 56 : Test de Worth.....	98
Figure 57 : Echelle visuelle analogique utilisée pour le test de sensibilité au flou.....	99
Figure 58 : Représentation des images de l'œil droit et gauche vues par le sujet lors de la réalisation de la tâche au test de sensibilité au mouvement.....	100
Figure 59 : Illusion du papier peint.....	108
Figure 60 : Conditions d'affichage du fond binoculaire et de la symbologie monoculaire....	109
Figure 61 : Conditions contrôle du fond binoculaire et de la cible monoculaire.....	110

Figure 62 : Conditions d'affichage dites « contrôle » du fond binoculaire et de la symbologie monoculaire.....	110
Figure 63 : Profil 1 de la pulsation présenté avec un contraste de maximal de 1 (A) et maximal de 0,6 (B).....	111
Figure 64 : Profil 2 de la pulsation présenté avec un contraste maximal de 1 (A) et 0,6 (B)...	112
Figure 65 : Profil 3 de la pulsation présenté avec un contraste maximal de 1 (A) et maximal de 0,6 (B)	113
Figure 66 : Conditions d'affichage du fond binoculaire et de la symbologie monoculaire	114
Figure 67 : Performance de suivi (erreur moyenne en minutes d'arc) en fonction des conditions contrôle.....	116
Figure 68 : Performance de suivi (erreur moyenne en minutes d'arc) en fonction de la pulsation de la symbologie monoculaire	117
Figure 69 : Performance de suivi (erreur moyenne en minutes d'arc) en fonction du contraste de la symbologie monoculaire.....	118
Figure 70 : Temps moyens de détection (ms) en fonction des caractéristiques du fond binoculaire.....	119
Figure 71 : Temps moyens de détection (ms) en fonction de la pulsation de la symbologie monoculaire.....	119
Figure 72 : Casque de réalité augmentée semi-transparent monoculaire, le TopMax®	128
Figure 73 : Ecran sur lequel était vidéoprojeté le fond binoculaire.....	129
Figure 74 : Conditions environnementales simulées en fonction de l'altitude de l'aéronef...	130
Figure 75 : Distribution des fréquences spatiales en fonction des conditions du fond binoculaire.....	131
Figure 76 : Symbologie utilisée dans le TopMax®(légende en jaune)	131
Figure 77 : Profil de la pulsation à opacité maximale de 100 %.....	132
Figure 78 : Opacité maximale (100 %) et minimale (40 %) du FPV quand il est soumis à pulsation	133
Figure 79 : Evènement présenté avec la symbologie (gauche) ou sur le fond binoculaire (droite).....	133
Figure 80 : Conditions d'affichage du fond binoculaire et de la symbologie monoculaire	134
Figure 81 : Fonctionnement du joystick pour la tâche de suivi de cible	134
Figure 82 : Eléments de la symbologie monoculaire (légende en jaune) et de la scène binoculaire (légende en blanc) nécessaires à la réalisation de la tâche de suivi de cible.....	135
Figure 83 : Boutons du joystick utilisés pour la tâche de détection d'évènement et le signalement d'une suppression visuelle	135
Figure 84 : Performance de suivi (erreur moyenne à la cible en minutes d'arc) en fonction des conditions environnementales.....	141
Figure 85 : Temps moyens de détection (en ms) en fonction des conditions environnementales et de la luminance de la symbologie monoculaire.....	142

Figure 86 : Nombre de pertes d'information en fonction des conditions environnementales	144
Figure 87 : Evolution temporelle des pertes d'information cumulées en fonction des conditions environnementales	146
Figure 88 : Piste réelle et piste synthétique en début (gauche) et en fin d'essai (droite).....	157

Liste des tableaux

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des différentes classes de visuels de casques.....	11
Tableau 2 : Luminances maximales et minimales des réseaux sinusoïdaux en fonction des trois conditions de contraste du fond	70
Tableau 3 : ANOVA évaluant l'effet d'entraînement	80
Tableau 4 : Répartition des participants en fonction de l'œil le meilleur.....	81
Tableau 5 : Répartition des participants en fonction de l'œil le meilleur de trois variables mesurées et des tests de dominance oculaire	82
Tableau 6 : ANOVA à mesures répétées sur les temps de détection, de latence et de fixation selon les caractéristiques de la symbologie monoculaire et le mode d'affichage des évènements en HF-100 %	86
Tableau 7 : ANOVA à mesures répétées sur les temps de détection, de latence et de fixation selon les caractéristiques de la symbologie monoculaire et le mode d'affichage des évènements en BF-100 %.....	87
Tableau 8 : ANOVA à mesures répétées sur les temps de détection, de latence et de fixation selon les caractéristiques de la symbologie monoculaire et le mode d'affichage des évènements en BF-60 %	88
Tableau 9 : ANOVA à mesures répétées sur les temps de détection, de latence et de fixation selon les caractéristiques de la symbologie monoculaire et le mode d'affichage des évènements en BF-20 %	89
Tableau 10 : Score moyen attribué par les participants par item de confort visuel.....	90
Tableau 11 : Matrice de corrélation des huit tests de dominance oculaire.....	102
Tableau 12 : Analyse factorielle des huit tests de dominance oculaire	103
Tableau 13 : Luminances moyennes et écart-types des images	130
Tableau 14 : Répartition des participants en fonction de l'œil le meilleur	139
Tableau 15 : T-test (<i>i.e.</i> performance de suivi et temps de détection) et χ^2 (<i>i.e.</i> perte d'information) en fonction de l'œil de présentation pour chaque condition environnementale	139
Tableau 16 : Répartition des participants en fonction de l'œil le meilleur de trois variables mesurées, de l'œil préféré et du résultat au test de sensibilité au flou.....	140
Tableau 17 : Test χ^2 sur le nombre de perte d'information en fonction des conditions environnementales.....	143
Tableau 18 : Tests χ^2 sur le nombre de perte d'information selon les conditions environnementales en fonction des caractéristiques de la symbologie monoculaire	144
Tableau 19 : Test χ^2 sur le nombre de perte d'information en fonction des caractéristiques de la symbologie monoculaire.....	145
Tableau 20 : Evaluation temporelle des pertes d'information.....	145
Tableau 21 : Evaluation temporelle des pertes d'information en fonction des conditions environnementales.....	146

Introduction générale – Contexte applicatif

Si je vous demande, quelle aptitude est indispensable pour être pilote, comme la majeure partie des gens, de manière intuitive, vous me répondrez une excellente vue. C'est en effet celui des sens qui est le plus mis à contribution en vol. Il est donc tout naturel qu'on ait cherché à faciliter la perception visuelle des pilotes à la fois pour accéder à des informations plus rapidement mais surtout pour piloter quelles que soient les conditions environnementales. L'innovation technologique, qui permet l'augmentation de la vision, est la réalité augmentée.

Dans le continuum de réalité-virtualité décrit par Milgram et al. (1994), la réalité augmentée (RA) se trouve avec la virtualité augmentée (VA), au sein du concept de réalité mixte (RM) (Figure 1). Alors que la virtualité augmentée consiste à ajouter un contenu physique dans l'environnement virtuel, la réalité augmentée se définit comme étant l'ajout d'un contenu virtuel interactif (en 2D ou 3D) combiné et superposé en temps réel à l'environnement réel (Milgram et al., 1994).

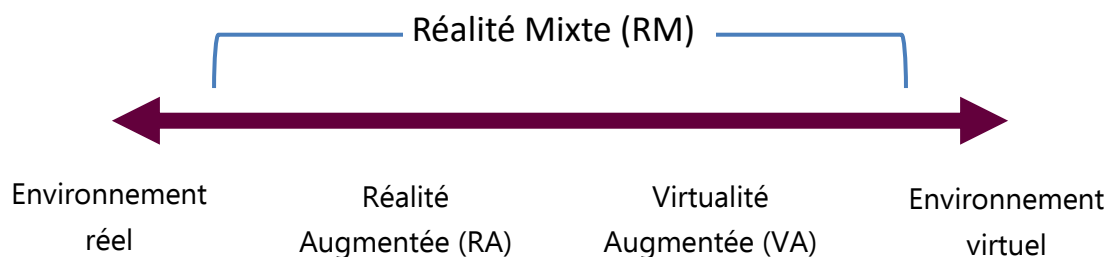


Figure 1 : Continuum réalité-virtualité de Milgram et al. (1994)

La réalité augmentée est un outil de divertissement ou d'aide à la vision dans de nombreux domaines tels que la chirurgie (Rolland et al., 2005), le secteur automobile (Velger, 1998), sur les chantiers de construction, ou pour un usage militaire (Glumm et al., 1998).

Il existe deux types de dispositif de réalité augmentée : *video-see-through* ou *video-pass-through* et *optical see-through*. Leur principe est détaillé ci-après. Après une veille technologique sur les visuels de casque monoculaires, leurs avantages et inconvénients sont détaillés.

I. Principes des dispositifs de réalité augmentée semi-transparentes

I.1. Principe des dispositifs de type « video-see-through » ou « video-pass-through »

La réalité augmentée la plus répandue est de type *video-see-through* ou *video-pass-through* (Figure 2). Elle consiste à filmer une scène réelle avec une caméra et à diffuser la vidéo ainsi obtenue sur un écran (téléphone portable, tablette ou casque immersif). Une image virtuelle, avec laquelle il est possible d'interagir, peut ensuite y être superposée (Milgram et al., 1994).

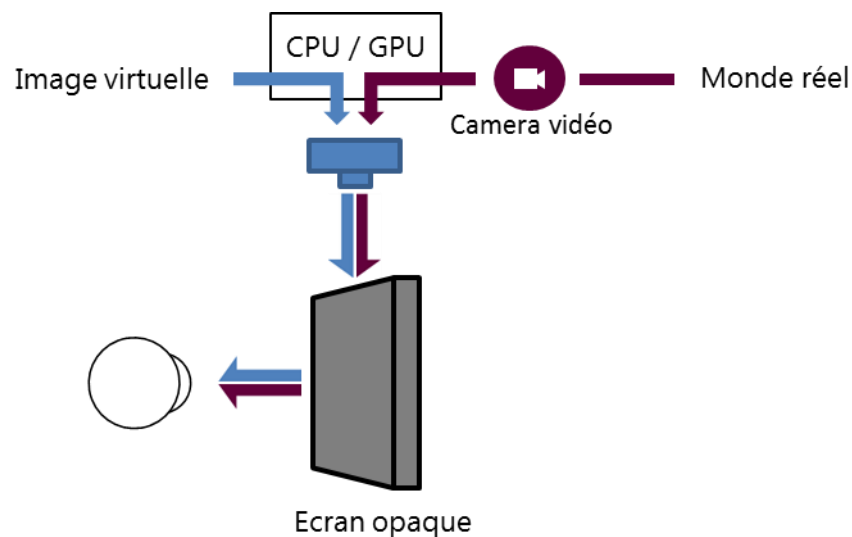


Figure 2 : Dispositif de réalité augmentée de type *video-see-through*

L'environnement est filmé et combiné avec une image virtuelle par le duo processeur central (*Central processing unit* ou CPU) et processeur graphique (*Graphics processing unit* ou GPU). Cette nouvelle image combinée est alors projetée sur un écran opaque.

I.2. Principe des dispositifs de type *optical see-through*

I.2.1. Principe général de la réalité augmentée de type *optical-see-through*

Un autre type de réalité augmentée, appelé *optical see-through* peut également être employé (Figure 3). Il consiste à projeter une image virtuelle sur une lame semi transparente à travers laquelle on peut voir l'environnement réel (Milgram et al., 1994).

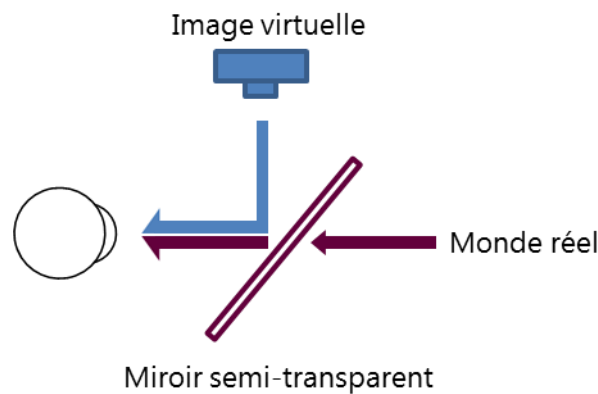


Figure 3 : Dispositif de réalité augmentée de type *optical-see-through*

Le monde virtuel est vu à travers un miroir semi-transparent placé devant les yeux de l'observateur. Ce miroir permet de réfléchir l'image virtuelle générée, combinant alors les deux images.

Deux types de support sont alors utilisés : un support fixe constitué d'une lame semi-transparente à l'image des affichages tête haute (*Head Up Display* ou HUD) utilisés notamment dans les domaines de l'aéronautique depuis les années 60 et depuis 1988 dans le domaine de l'automobile ; la lame semi-transparente peut également être déportée sur un support de tête et l'image virtuelle est ainsi projetée au plus près des yeux de l'utilisateur (Velger, 1998) et superposée à l'environnement. Le champ panoramique grâce aux mouvements de la tête est alors plus grand qu'avec un affichage tête haute. Ce principe constitue alors un visuel de casque (*Head Mounted Display* ou HMD) ou un viseur de casque (*Head Mounted sights* ou HMS) défini succinctement par Melzer et al. (2009) comme étant une source diffusant l'image avec une optique collimatée sur un support de tête. Dans tous ces dispositifs, l'image virtuelle est collimatée (Rash et al., 2009) de sorte que l'information soit directement devant les yeux des utilisateurs à une distance en adéquation avec la scène d'intérêt réelle (*i.e.* environnement).

I.1.1. Réalité augmentée de type *optical-see-through* dans l'aviation

Lorsqu'ils sont utilisés dans l'aviation, les visuels de casque ou les affichages tête haute peuvent avoir plusieurs fonctions selon les images qu'ils diffusent. De manière générale, ils permettent au pilote d'avoir un accès plus rapide aux informations habituellement disposées sur les instruments de vols primaires (*Primary Flight Display* ou PFD) telles que l'horizon artificiel, la vitesse de l'avion, son altitude, etc... On appelle symbologie, l'ensemble de ces informations diffusées directement devant les yeux du pilote (Figure 4).



Figure 4 : Exemple de symbologie utilisée dans les aéronefs civils

Le champ de vision possède différentes zones (Figure 5) et la symbologie est construite de sorte que plus l'information est importante plus elle est au centre du champ de vision.

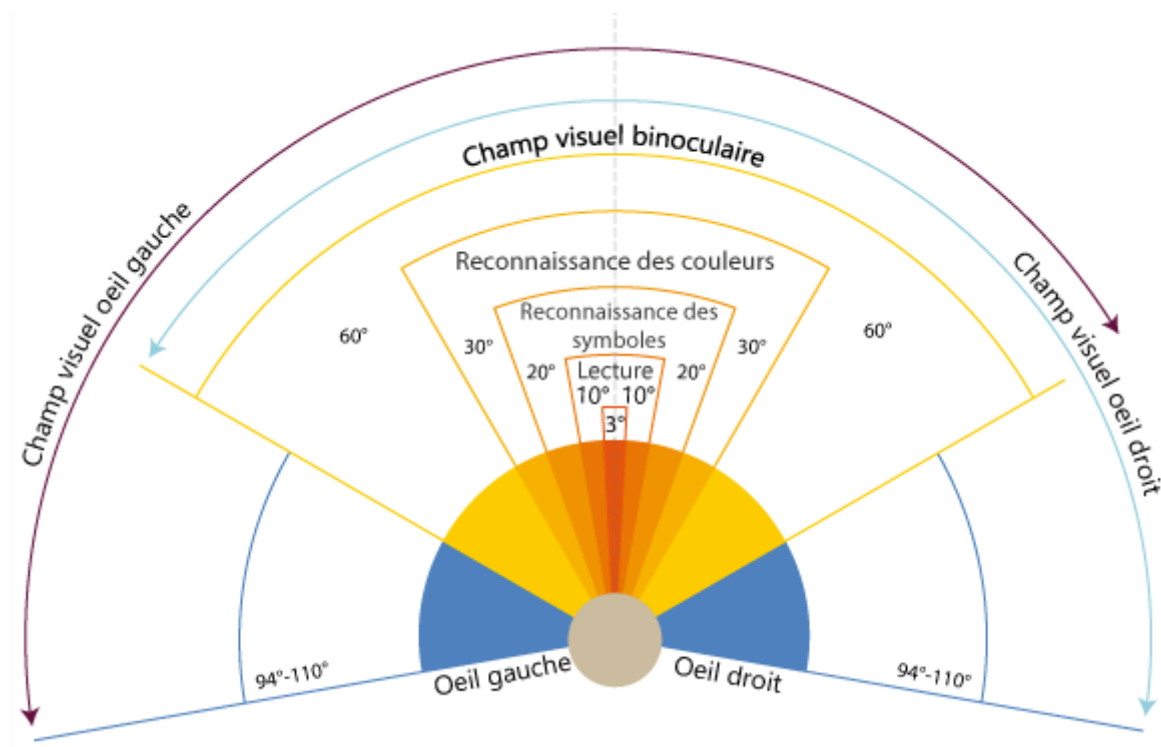


Figure 5 : Champ binoculaire et champs monoculaires

Le champ de vision total de l'Homme est de 200° à l'horizontale et de 130° à la verticale.

Dans les symbologies de vol utilisées notamment dans les affichages tête haute ou visuels de casque des avions commerciaux, il faut distinguer quatre types de symboles :

- Les symboles d'alerte non conformes. Ils sollicitent l'attention exogène pour sortir le pilote de sa tâche actuelle. Ces alertes s'affichent pour faire face à une situation anormale (défaillance du système, alerte tactique, ...). Ils doivent être affichés dans le champ de lecture (Figure 5) mais leur dynamique et leurs couleurs doivent être appropriées pour maximiser

l'alerte sans obscurcir la vue. Dans la symbologie utilisée par Thales AVS, seules les alertes d'avertissement sont affichées sous forme d'informations textuelles dans une grande police blanche avec un fond rouge. Il disparaît une fois que l'équipage en a pris connaissance. Un effet dynamique peut être associé à ces symboles pour augmenter l'alerte (zoom, déplacement, clignotement) ;

- Les symboles essentiels non conformes. Ils présentent les informations nécessaires à la réalisation de la tâche en cours. Ils peuvent varier en fonction de cette tâche mais contiennent classiquement la vitesse, l'altitude, le cap, les paramètres du moteur et le vent. Ces symboles doivent être affichés dans le champ de reconnaissance (Figure 5) ;

- Les symboles conformes. Ils sont affichés sur le HMD dans le référentiel terrestre et ont donc une dynamique à l'écran en fonction des mouvements de l'aéronef et de la tête. Ils ont pour but d'aider le pilote à naviguer, à acquérir des références visuelles et à piloter. Les principaux symboles conformes sont la ligne d'horizon, le vecteur vitesse, la piste synthétique et le terrain synthétique (*Synthetic Vision System* ou SVS) si disponible. La piste synthétique facilite les manœuvres en conditions environnementales dégradées (*i.e.* brouillard, nuit, fortes pluies) ;

- Les symboles d'information. Ils ne sont pas essentiels pour réaliser la tâche en cours, mais leur affichage tête haute permet de fournir un accès direct à des informations secondaires.

Dans les visuels de casque, la symbologie est asservie en temps réel à l'aéronef pour retranscrire les symboles conformes (*i.e.* vecteur vitesse, horizon artificiel, piste synthétique, etc...). La symbologie est également asservie en temps réel à la position de la tête du pilote pour que des informations non liées à la position de l'aéronef soient visibles dans son champ de vision même lorsqu'il tourne la tête (symboles essentiels non conformes ou symboles d'information).

Velger et al. (1998) montrent que les visuels de casque permettent d'améliorer le sentiment de présence de l'utilisateur et augmentent la mobilité de la tête par rapport à l'affichage tête haute qui lui est fixe dans l'habitacle. L'affichage tête haute est par ailleurs difficile à intégrer dans un aéronef initialement non équipé. On peut cependant aisément y intégrer un visuel de casque.

Contrairement aux afficheurs tête haute ou aux visuels de casques, les viseurs de casque (*Head Mounted Sights* ou HMS) ne présentent qu'un simple symbole tel qu'une croix ou un cercle permettant aux utilisateurs de viser une cible (Figure 6).



Figure 6 : Comparaison de la symbologie dans les viseurs et visuels de casque

Réticule de viseur de casque de type VTAS (Visual Targeting Acquisition Systems) à gauche et symbologie du visuel de casque JHMCS à droite (Melzer, 2014).

Une autre caractéristique qui différencie les viseurs de casque des visuels de casque est la résolution et la taille du champ de vision. En effet, alors que la symbologie des viseurs de casque se concentre sur 6° d'angle visuel environ, les symbologies complexes recevant les informations de l'aéronef et des vecteurs d'armes nécessitent un champ de vision plus grand. Par exemple, le *Joint Helmet Mounted Cueing System* (JHMCS, Raytheon Technologies, Waltham, MA, Etats-Unis) propose un champ de vision de 20°. Cette limitation est due au fait que le champ de vision, la résolution et la distance focale de l'optique collimatrice sont liés par la relation suivante :

$$H = F * \tan \theta$$

où F est la distance focale de l'optique collimatrice, H la dimension de l'image source et θ le champ de vision. H peut aussi être la dimension d'un pixel et θ sera alors la résolution ou la dimension apparente du pixel dans l'image (Figure 7).

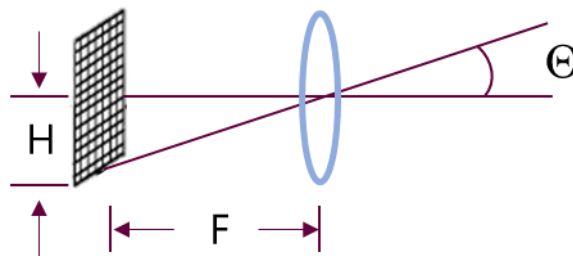


Figure 7 : Relation entre distance focale et champ de vision

La distance focale F de l'optique collimatrice détermine la relation entre H, la dimension de l'image source et θ , le champ de vision (ou la résolution) (Melzer, 2014).

Résumé : Il existe deux types de dispositif de réalité augmentée : les *video-see-through* ou *video-pass-through* et les *optical see-through*. Pour l'aviation, c'est ce dernier type qui est utilisé. Il est composé d'une source d'image virtuelle projetée sur une optique collimatrice semi-transparente et superposée visuellement à l'environnement réel. Ces dispositifs permettent l'augmentation de la vision de l'utilisateur et notamment des pilotes d'aéronefs pour les aider dans leur tâche de visée de missile, de pilotage, ou pour obtenir des informations de mission. Alors que l'affichage tête haute est fixe, le visuel et le viseur de casque sont portés sur la tête pour maintenir l'information constamment devant les yeux.

II. Historique des visuels de casque monoculaires dans l'aviation

Lorsque l'on étudie la chronologie de ces dispositifs, les précurseurs sont les viseurs de casque (Foote et Melzer, 2015). Les premiers viseurs de casque utilisés dans les années 1970 étaient monoculaires et servaient d'aide aux pilotes dans les tâches de visée de cible air-air. C'est le cas notamment du *Visual Targeting Acquisition Systems* (VTAS) mis à disposition des pilotes de F-4 Phantom (Boeing, Chicago, IL, Etats-Unis) de l'armée américaine entre 1973 et 1979 (Foote et Melzer, 2015). Du fait de l'incompatibilité du casque et de la technologie des missiles, ce programme a dû être abandonné avant d'être déployé. L'armée soviétique, en 1985, a remis en service ces systèmes d'aide à la visée avec le Shchel-4UM équipant les Su-27 et MiG-29 (Compagnie aéronautique unifiée, Moscou, Russie)¹. Ce système est constitué d'un viseur, monté sur un casque, combiné à un missile. Puis en 1993-1994, les Israéliens déploient le viseur de casque Dash (Elbit Systems, Haïfa, Israël) qui lie également le viseur à un missile (Foote et Melzer, 2015). Alors que des études montrent l'intérêt militaire et opérationnel d'utiliser un viseur de casque couplé à un affichage tête haute plutôt qu'un affichage tête haute seul (Arbak, 1989 ; Merryman, 1994), les américains ont intégré dans leurs armées (U.S.Navy et U.S. Airforce) un visuel de casque monoculaire, le JHMCS au début des années 2000 (Figure 8). Il diffuse aux pilotes une symbologie de ciblage de missile, le statut de l'aéronef et une meilleure connaissance de la situation dans l'espace aérien (Melzer et al., 2009) de jour comme de nuit. Alors que ces derniers ont été mis à disposition des pilotes d'avions de chasse, l'*Integrated Helmet And Display Sight System* (IHADSS, Honeywell, Charlotte, NC, Etats-Unis) a été utilisé, au sein de l'armée américaine bien avant, dans les années 80, par les pilotes de l'hélicoptère d'attaque Apache AH-64 (Boeing, Chicago, IL, Etats-Unis) (Figure 8) (Rash et al., 1998). C'est un dispositif également

¹<https://web.archive.org/web/20100812012615/http://www.nationalmuseum.af.mil/factsheets/factsheet.asp?id=8672> ; consulté le 22 Décembre 2020.

monoculaire servant de support à la présentation d'imagerie de vision de nuit (grâce à une caméra placée à l'avant de l'appareil), de la symbologie des instruments de navigation de jour comme de nuit et de l'information sur les vecteurs d'armes. L'image monochrome présentée sur l'œil droit ainsi visible est connectée en temps réel au casque du pilote, asservie à son mouvement de tête et superposée à l'environnement. C'est donc le précurseur majeur des visuels de casque du fait du grand nombre d'informations qu'il délivre.



Figure 8 : Visuels de casque monoculaires utilisés dans l'armée américaine

Le IHADSS utilisé par les pilotes d'Apache AH-64 dans les années 80 est présenté sur l'image de gauche et le JHMCS par les pilotes de F-15, F-16 et F/A-18 au début du 21^{ème} siècle sur l'image de droite (Melzer, 2014).

Dans l'aviation, la conception de l'aéronef oriente le choix du visuel de casque qui lui sera associé. En effet, une fois la production de l'appareil lancée, s'il n'y a pas d'affichage tête haute de prévu par le constructeur, c'est à l'acheteur de définir de quel équipement les utilisateurs devront se munir. Ainsi il peut y avoir autant de visuels de casque que d'acheteurs potentiels d'aéronefs. Dans le domaine militaire, chaque armée peut donc choisir le visuel de casque adapté aux missions de chaque appareil. Par exemple, aujourd'hui le dispositif binoculaire TopOwl® (Thales, Paris, France) est utilisé par 16 pays sur plusieurs appareils. On le retrouve à bord de la version « forces spéciales » du NH90 (NHIndustries, Aix-en-Provence, France), hélicoptère utilisé par plusieurs pays européens dont la France mais également à bord du Tigre (Airbus Helicopters, Marignane, France) des armées française, allemande, espagnole et australienne¹. L'armée turque utilise le visuel de casque binoculaire *AVCI Helmet Integrates Cueing System*, à bord du T-129 ATAK (Ahusta, Cascina Costa di Samarate, Italie), un hélicoptère d'attaque semblable à l'Apache AH-64 américain².

Les dispositifs monoculaires sont encore en service aujourd'hui. C'est le cas du Scorpion® (Thales, Paris, France) qui est utilisé par l'armée américaine à bord de ses F-16 (Lockheed Martin, Bethesda, MD, États-Unis) mais également avec les EF-18 (Boeing, Chicago,

¹<https://www.thalesgroup.com/fr/marches/aeronautique/cockpit-equipements-fonctions-avioniques/topowl-le-viseur-casque-helicopteres>, consulté le 22 Décembre 2020.

²<https://www.defenceturkey.com/en/content/aselsan-turkey-s-avionics-leader-2990>, consulté le 22 Décembre 2020.

IL, Etats-Unis) de l'armée espagnole (version basée sur le F-18A). Le JHMCS évoqué précédemment est également toujours en service aujourd'hui.

Bien que répandus dans les différentes armées à travers le monde, les visuels de casques ne sont à ce jour pas déployés dans l'aviation civile.

Résumé : Les dispositifs monoculaires sont utilisés dans le monde entier par de nombreux pilotes militaires depuis plusieurs décennies et encore aujourd'hui.

III. Avantages et problématiques des visuels de casque monoculaires

Dans l'aviation, l'intérêt pour le pilote de ne plus avoir à regarder les instruments de base en baissant la tête est double : tout d'abord, il garde les informations essentielles en visuel plus longtemps, que ce soit l'environnement ou les instruments de base ; ensuite, il réduit sa fatigue visuelle induite par le changement de mise au point entre la vision de loin (*i.e.* environnement) et la vision de près (*i.e.* instruments). En effet, dans ces dispositifs, l'image virtuelle est collimatée à l'infini optique (Rash et al., 2009). Ainsi, l'information est directement devant les yeux des utilisateurs à une distance en adéquation avec la scène d'intérêt réelle (*i.e.* environnement). Le fait de garder le focus au même endroit réduit également le changement de luminosité et permet ainsi de conserver une adaptation à la luminosité cohérente avec l'environnement.

Le visuel de casque peut être catégorisé selon son mode d'affichage. Il peut être bioculaire (la même image est affichée aux deux yeux). C'est un mode qui se retrouve notamment sur les premiers visuels de casque diffusant des images de vision de nuit puisque les avions ne disposaient que d'un seul capteur infrarouge (c'est le cas du *Aviator Night Vision Imaging System* ou ANVIS monté sur un casque de pilote de l'Apache AH-64 dans les années 80). L'affichage peut également être binoculaire (deux images légèrement décalées spatialement pour chaque œil garantissant l'effet de parallaxe horizontale) ou monoculaire (une image est affichée sur un seul œil).

Les visuels de casque monoculaires possèdent l'avantage de fournir une seule source d'image permettant de diminuer le poids de l'équipement et d'être plus facilement ajustables qu'un équipement binoculaire dont les deux imageurs doivent être bien centrés devant chaque œil de l'utilisateur (Melzer et al., 2009) (Tableau 1). La perception visuelle dans les visuels de casque, qu'ils soient binoculaires, bioculaires ou monoculaires n'est pas naturelle du fait de la projection de l'image qui est directement asservie au mouvement de la tête (notre perception naturelle de l'environnement ne se déplace pas en fonction du déplacement de notre tête). La présentation d'une image monoculaire devant un seul œil accentue cette perception non naturelle (Patterson, Winterbottom, et Pierce, 2006). En effet,

les deux yeux ne sont pas stimulés de la même façon et une compétition s'opère entre ces deux représentations. On parle alors de rivalité binoculaire. Certaines études ont d'ailleurs mis en évidence des difficultés liées aux dispositifs de réalité augmentée monoculaires ou des performances moins bonnes que leurs homologues binoculaires. En effet, Browne et al. (2010) ont évalué le temps de réaction de pilotes en simulateur de vol pour la détection de cible sur un fond binoculaire avec et sans image monoculaire. Ils ont montré une meilleure performance de détection lorsque qu'il n'y avait pas d'image monoculaire. Il est montré cependant qu'avec de l'entraînement, les temps de réaction, dans chacune des configurations, diminuent et l'écart entre les deux configurations après six jours se resserre. D'autres études ont fait état de problèmes liés aux dispositifs de réalité augmentée monoculaires, notamment Capo-Aponte et al. (2009) et Hershberger et Guerin (1975) qui mentionnaient que certains pilotes rapportaient des maux de tête, des tiraillements oculaires et des nausées en situation de vol. L'étude de Hale et Piccione (1989) cité par Rash et al. (1998) portant sur l'évaluation de l'IHADSS a reporté une augmentation de la charge de travail accompagnée de fatigue visuelle et mentale ainsi que du stress. Les pilotes ont indiqué qu'ils devaient parfois fermer un œil pour diriger leur attention soit sur la scène d'intérêt soit sur l'information de l'œil augmenté. Ces aspects sont selon ces auteurs caractéristiques de la rivalité binoculaire (Capo-Aponte et al., 2009 ; Hale et Piccione, 1989 ; Hershberger et Guerin, 1975 ; Rash et al., 1999). Néanmoins, il n'y a pas de suppression mentionnée dans ces études.

Bien que ces problématiques aient été observées dans les années 90-2000, aujourd'hui encore, ces systèmes sont déployés parmi les forces américaines mais également européennes. C'est le cas, par exemple, du JHMCS et du Scorpion, ou encore du dispositif TopOwl® qui lui propose un affichage binoculaire pour ce qui est des informations de vision de nuit grâce aux intensificateurs de lumière disposés sur les côtés du casque mais l'affichage de la symbologie de vol est monoculaire.


A ce jour, il n'y a pas de visuels de casque monoculaires en service dans l'aviation civile. C'est pour leurs nombreux avantages comparés aux visuels de casque bio/binoculaires qu'il est envisagé de mettre en place des dispositifs monoculaires particulièrement dans les aéronefs ne disposant pas d'affichage tête haute. L'utilisation lors des phases d'atterrissage ou de décollage de l'avion est envisagée. En effet, selon un rapport sur les accidents d'avion commerciaux entre 1958 et 2019 par Boeing¹ (Chicago, IL, Etats-Unis), 63 % d'entre eux ont eu lieu soit en phase de décollage soit en phase d'atterrissage.

Cette thèse a été réalisée dans un cadre industriel : celui d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE). L'entreprise Thales AVS subventionné par l'Association Nationale Recherche Technologie (ANRT) a financé ce projet. Thales AVS est spécialisé dans la recherche et le développement d'équipements d'aide à la navigation.

¹Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents ; Worldwide Operations ; 1959-2019, http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf, consulté le 25 Janvier 2021

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des différentes classes de visuels de casques.

Ils possèdent chacun leurs avantages et inconvénients (Melzer et al., 2009). Pour chaque type d’affichage, il est présenté un exemple de visuel de casque correspondant. Les avantages et inconvénients de chaque type sont comparés aux deux autres quand ce n’est pas précisé.

	Bioculaire	Binoculaire	Monoculaire
Exemples	 <p>Gen III HMDS (Raytheon Technologies, Etats-unis)</p>	 <p>TopOwl® (Thales, France)</p>	 <p>TopMax® (Thales, France)</p>
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Champ de vision large • Pas de rivalité binoculaire • Facile à ajuster • Plus léger que les binoculaires • Moins cher que les binoculaires 	<ul style="list-style-type: none"> • Vision stéréoscopique (aide l’appréciation de la profondeur) • Amélioration de la reconnaissance des cibles • Centre de masse symétrique • Redondance de l’information 	<ul style="list-style-type: none"> • Poids minimum • Alignement et ajustements plus simples • Moins cher
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Plus lourd que le monoculaire • Luminance réduite par rapport au monoculaire • Perte de certains indices de profondeur • Alignement plus difficile que le monoculaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Optique plus lourde • Alignement et ajustements plus difficiles • Plus cher 	<ul style="list-style-type: none"> • Rivalité binoculaire • Centre de masse asymétrique • Petit champ de vision (26° par 20°) donc moins d’informations • Perte de certains indices de profondeur

A l’origine utilisés par les pilotes militaires, les aides à la vision et plus particulièrement les systèmes de réalité augmentée se sont démocratisés et ont intégré progressivement les flottes commerciales. Etant donnée la difficulté que représente l’installation d’un affichage tête haute dans un cockpit, les industriels ont donc cherché une alternative pour les prochaines suites avioniques ou dans les aéronefs n’en disposant pas. Thales AVS a donc élaboré un dispositif dont il convient d’endiguer les contraintes perceptives via un appui scientifique pour convenir aux acheteurs potentiels mais surtout aux utilisateurs. Ce projet s’inscrit en avance de phase de la commercialisation du dispositif TopMax®. Plutôt que d’adapter l’utilisateur au dispositif comme cela a pu être fait avec certaines technologies, il faut se positionner dans une démarche ergonomique et adapter le dispositif à l’humain.

Ce projet s'est donc monté en collaboration avec l'unité perception du département Neurosciences et Sciences Cognitives (NSCo) de l'Institut de Recherches Biomédicales des Armées (IRBA). Les unités de recherche du département NSCo contribuent à étudier l'adaptation aux systèmes opérationnels et à la prise en compte de la composante humaine au sein du couple humain/système. L'unité perception au sein de ce département évalue notamment les composantes visuelles humaines et comment l'homme perçoit et interagit avec son environnement.

Il convient donc à travers ce projet de thèse de tenter de limiter l'inconvénient majeur des visuels de casque monoculaires, à savoir la rivalité binoculaire. La compréhension du phénomène pourra permettre d'optimiser la présentation des informations et rendre l'utilisation des visuels de casque monoculaires fiable en toute circonstance.

Résumé : Les visuels de casque monoculaires permettent un ajustement plus facile devant l'œil du pilote par rapport aux visuels de casque bio/binoculaire. Un seul imageur comparé aux deux que propose le binoculaire permet de réduire son poids et son coût. Malgré ces avantages, il subsiste des inconvénients à son utilisation. En effet, il peut générer de la rivalité binoculaire connue pour procurer des pertes d'information et de la fatigue visuelle.

Partie 1 : Etat de l'art

I. Fusion binoculaire	14
I.1. Organisation anatomo-fonctionnelle des voies visuelles lors du traitement de l'information visuelle par les deux yeux	14
I.2. Fusion motrice et sensorielle.....	18
II. Rivalité binoculaire	21
II.1. Dynamique de la rivalité binoculaire	21
II.1.1. Principes fondamentaux	21
II.1.2. Etudes psychophysiques évaluant la dynamique de la rivalité binoculaire.....	26
II.2. Mécanismes neurophysiologiques de la rivalité binoculaire.....	28
II.2.1. Hypothèse d'une compétition oculaire impliquant une résolution à bas niveau cortical.....	28
II.2.2. Hypothèse d'une compétition des stimuli impliquant une résolution à haut niveau cortical.....	32
II.2.3. Hypothèse d'une sélection attentionnelle dans la résolution du conflit.....	35
II.2.3.1. Attention endogène ou attention volontaire	36
II.2.3.2. Attention exogène ou attention involontaire.....	39
II.2.3.3. Cécité attentionnelle.....	41
II.3. Modèles multi-niveaux traduisant le phénomène	41
III. Vision binoculaire et visuels de casque monoculaires	45
III.1. Impact des caractéristiques des stimulations monoculaires et binoculaires.....	45
III.2. Impact de la dominance oculaire.....	52
III.3. Impact de l'attention	54
III.4. Évaluation du confort visuel en lien avec les visuels de casque.....	55
IV. Synthèse de l'état de l'art.....	57
V. Problématiques et hypothèses.....	59

La vision est le phénomène par lequel l'être vivant intègre et utilise les informations venues du système visuel pour répondre à ses besoins. Chez l'Homme, le système visuel intègre deux capteurs que sont les yeux. Lorsque les deux informations reçues par chacun des yeux sont compatibles, le cerveau établit alors une perception simple (*i.e.* non dédoublée) de la scène d'intérêt par l'intermédiaire de la fusion binoculaire présentée dans un premier chapitre de cet état de l'art (Chapitre Partie 1 :I).

Si des informations incompatibles parviennent à deux régions rétiniennes correspondantes des deux yeux, cela provoque de la rivalité binoculaire dont fait l'objet le deuxième chapitre de cet état de l'art (Chapitre II). Une brève superposition des deux images (de l'ordre de 100 ms) est perçue, suivi d'une alternance des deux images ou d'une perception mixte d'une partie des deux images.

Lors de l'utilisation de systèmes de réalité augmentée monoculaire, une image monoculaire est projetée sur un fond binoculaire. Ce type de stimulation génère de la fusion binoculaire mais peut parfois générer de la rivalité binoculaire. Le troisième chapitre de cet état de l'art détaille la perception particulière via ces dispositifs et les facteurs visuels et attentionnels qui semblent impacter les performances lors de l'utilisation des visuels de casque monoculaire (Chapitre III).

I. Fusion binoculaire

Dans ce chapitre, il sera tout d'abord décrit le phénomène de fusion binoculaire en commençant par la description de l'organisation anatomo-fonctionnelle des voies visuelles dans le cas d'une vision normale d'une scène d'intérêt (Chapitre I.1). Puis, il sera décrit comment les fusions motrice et sensorielle opèrent (Chapitre I.2).

I.1. Organisation anatomo-fonctionnelle des voies visuelles lors du traitement de l'information visuelle par les deux yeux

Les rayons lumineux traversent tout d'abord la cornée, l'humeur aqueuse, le cristallin et l'humeur vitrée qui sont des milieux transparents avant d'arriver sur la rétine. Cette structure neuronale est le point de départ d'un important réseau neuro-anatomique traitant l'information visuelle en la transformant en signal électrique au niveau des cellules ganglionnaires de la rétine (Purves, 2004). Les axones de ces cellules se regroupent pour former le nerf optique et se dirigent vers le chiasma optique, où la semi-décussation* des fibres des nerfs optiques droit et gauche a lieu. Les fibres en provenance de l'hémi-rétine nasale droite (60% des fibres de l'œil droit) vont alors croiser celles en provenance de l'hémi-rétine nasale gauche pour rejoindre l'hémisphère controlatéral* (Figure 9). Les fibres de

* Voir Annexe 1 : Glossaire

l'hémi-rétine temporale (40% des fibres) ne subissent pas de décussation et se dirigent vers l'hémisphère ipsilatéral* (Palmer, 1999 ; Rachel et Reese, 2009). Les axones des cellules ganglionnaires deviennent les tractus optiques, contenant ainsi des fibres des deux yeux. Ensuite, 80 à 90% de ces axones vont donner naissance à la voie rétino-corticale en rejoignant les corps genouillés latéraux (CGL) (Figure 9) (Sherman et Guillery, 1996). Les 10 à 20% restant rejoignent directement le colliculus supérieur pour former la voie rétino-tectale (Figure 9) (Sherman et Guillery, 1996). Cette dernière est en charge de l'orientation des yeux et de la tête. La voie rétino-prétectale est quant à elle, le centre du réflexe photomoteur et la voie rétino-hypothalamique, responsable de la synchronisation des rythmes biologiques sur le cycle jour/nuite (Figure 9).

La voie rétino-corticale est la voie neuronale de la perception visuelle consciente et est au centre des questionnements sur le processus de rivalité binoculaire par son organisation anatomo-fonctionnelle.

Le CGL est une structure paire et symétrique, de part et d'autre du mésencéphale. Il est formé de six couches distinctes formant trois voies dans lesquelles les cellules se répartissent comme suit : les cellules de grande taille des couches une et deux forment la voie magnocellulaire essentielle pour les tâches exigeant une haute résolution temporelle et serait donc impliquée dans l'évaluation de la vitesse et la direction d'un objet en mouvement rapide (Purves, 2004); les cellules assez petites des couches trois à six forment la voie parvocellulaire importante pour une vision à haute résolution spatiale ; et les cellules encore plus petites des six sous-couches intercalées forment la voie koniocellulaire dont la fonction n'est pas encore aujourd'hui très bien établie mais elle serait sensible aux courtes longueurs d'onde. Les couches une, quatre et six du CGL reçoivent les axones de l'hémi-rétine nasale controlatérale tandis que les couches deux, trois et cinq du CGL reçoivent les axones de l'hémi-rétine temporale ipsilatérale. Ainsi, bien que les neurones afférents des deux yeux se retrouvent dans chaque CGL, ils restent monoculaires (ils ne répondent à la stimulation que d'un seul œil). Cette organisation est liée à la semi-décussation des hémi-rétines nasales en amont, au niveau du chiasma optique (Chaumillon, 2015).

* Voir Annexe 1 : Glossaire

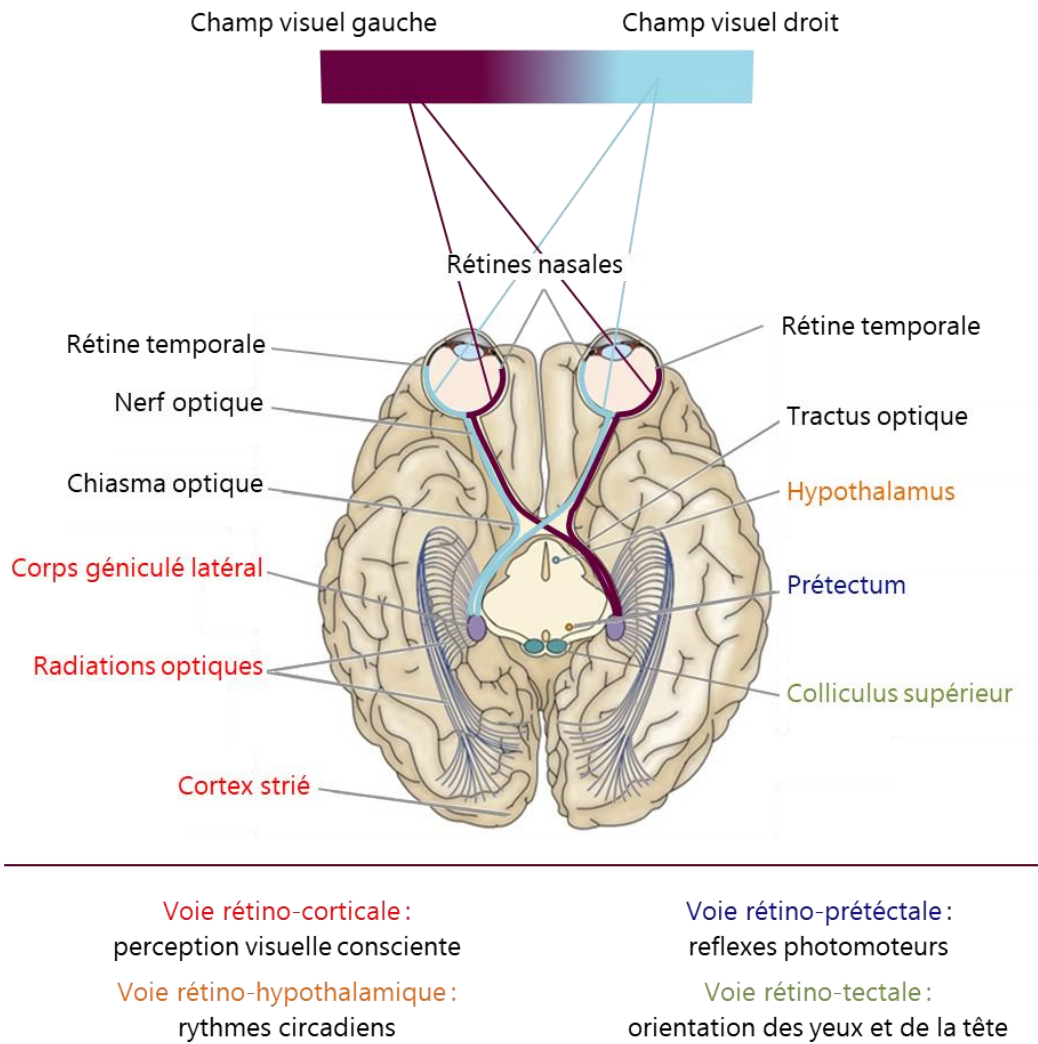


Figure 9 : Trajets des voies visuelles depuis la rétine

Les fibres issues de la rétine nasale de l'œil gauche et celles issues de la rétine temporale de l'œil droit (captant les informations provenant du champ visuel gauche) se projettent dans l'hémisphère cérébral droit, et les fibres issues de la rétine nasale de l'œil droit et celles issues de la rétine temporale de l'œil gauche (captant les informations provenant du champ visuel droit) se projettent dans l'hémisphère cérébral gauche. Image modifiée de Purves (2004).

Après le CGL, les fibres forment les radiations optiques et véhiculent l'information jusqu'au cortex visuel, situé aux pôles postérieurs des lobes occipitaux où l'on trouve les premiers neurones binoculaires (ils répondent à la stimulation des deux yeux) (Hubel et Wiesel, 1965). L'aire visuelle primaire (V1 ou cortex visuel primaire ou cortex strié ou aire 17 de Brodmann) est une sous-région fonctionnelle du cortex visuel divisée en six couches dont la quatrième reçoit la majeure partie des radiations optiques des deux yeux et où se forme la fusion sensorielle caractérisant la vision stéréoscopique ou stéréopsie (Purves, 2004). Dans l'aire visuelle primaire et particulièrement dans la couche quatre, certains neurones répondent comme dans le CGL, à la stimulation d'un seul œil (neurones monoculaires) mais d'autres répondent à la stimulation des deux yeux (neurones binoculaires) (Dougherty et al., 2019). En dehors de la couche quatre, les neurones du cortex visuel primaire sont tous

binoculaires. Les deux signaux en provenance des deux yeux ne restent donc séparés que jusqu'à ce qu'ils rejoignent l'aire visuelle primaire.

Une fois transmises à l'aire visuelle primaire, les informations sont conduites jusqu'aux aires extrastriées correspondant à toutes les aires autres que V1 (Felleman et Essen, 1991). L'aire visuelle secondaire (ou V2) reçoit une forte proportion des connexions de l'aire visuelle primaire et envoie les informations aux aires préstriées. Ces aires préstriées correspondent aux aires associatives qui sont toutes les aires impliquées dans le traitement des informations visuelles autres que l'aire visuelle primaire et secondaire (V3, V4 et V5). Ces informations sont véhiculées au travers de deux voies distinctes (Figure 10). La voie dite dorsale serait une extension de la voie magnocellulaire sollicitée lors des déplacements d'objets et serait nécessaire au contrôle des actions motrices. Elle se compose d'une partie de l'aire visuelle V3 et de V5 (appelée MT pour aire médio-temporale chez le macaque) et se dirige vers le cortex pariétal. La voie dite ventrale relie V1 aux aires V2 et V3 puis gagne V4. Cette voie est impliquée dans la détection des couleurs mais également des formes et se dirige ensuite dans le cortex inférotemporal.

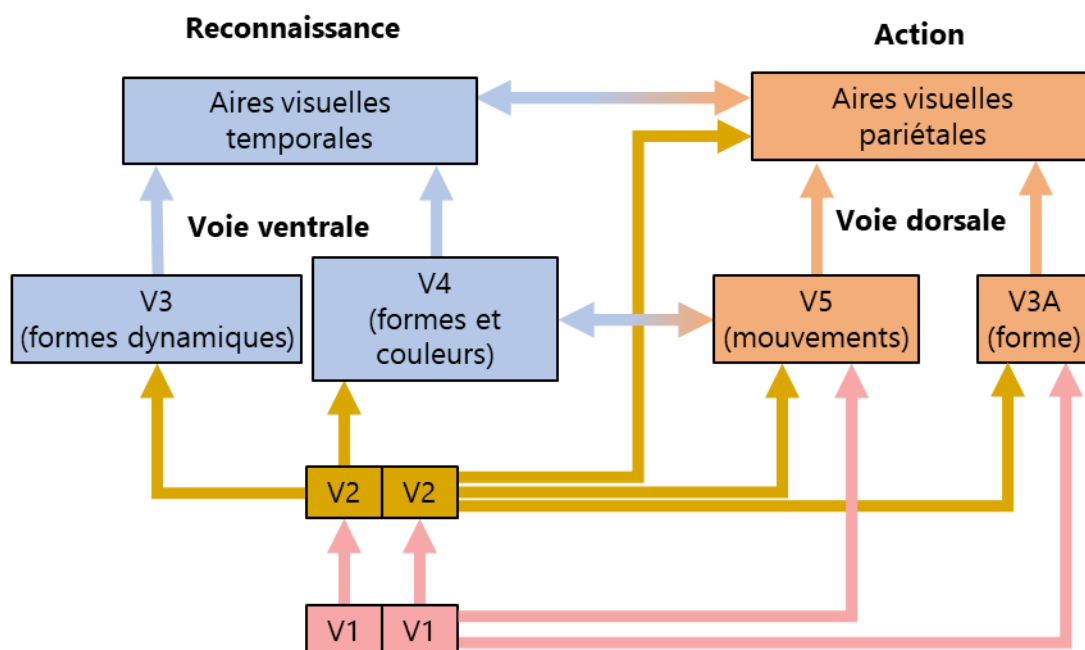


Figure 10 : Voies de traitement ventrale et dorsale

Les informations provenant du CGL se retrouvent principalement dans la couche quatre de V1. Elles sont diffusées aux autres couches puis dans l'aire visuelle secondaire qui diffuse aux aires préstriées. La voie dorsale impliquée dans la perception des données spatiales et du mouvement relie V1 à la partie postérieure du lobe pariétal qui se compose d'une partie de V3 et de V5 (aire médio-temporale (MT) chez le macaque). La voie ventrale relie V1 à V2 et V3 puis gagne le cortex inféro-temporal (V4). Cette voie est impliquée dans le traitement de la reconnaissance d'objet.

Bien que décrit de façon hiérarchique, le traitement de l'information ne se résume pas à un passage d'un niveau à l'autre depuis la rétine jusqu'aux cortex pariétal et inférotemporal.

En effet, plusieurs études ont montré que les différentes aires partagent une forte interconnexion pour pouvoir communiquer entre elles (Zeki et Shipp, 1988). Deux types de connexions cortico-corticales excitatrices existent. Les connexions intrinsèques tout d'abord, qui connectent les neurones d'une même aire (Fitzpatrick, Lund, et Blasdel, 1985) et les connexions extrinsèques ensuite, qui relient entre elles des aires voisines (Fitzpatrick, Lund, et Blasdel, 1985). Ces dernières peuvent être de type *feedforward* ou de type *feedback*. Les connexions de type *feedforward* transmettent l'information d'une aire inférieure à une aire supérieure et donc de la rétine aux différentes aires corticales selon un modèle ascendant ou *bottom-up* (de bas en haut). Inversement, les connexions *feedback* transmettent l'information d'une aire supérieure à une aire inférieure selon un modèle descendant ou *top-down* (haut en bas). Selon Hupé et al. (1998), ces connexions interviendraient dans l'extraction de la forme du fond pour des stimuli peu visibles.

La perception d'un objet simple, non dédoublé, résulte d'un traitement complexe. Les informations visuelles de cet objet peuvent être traitées différemment selon trois niveaux de traitement :

- un traitement dit de bas niveau qui concerne le contraste, la couleur, l'orientation, la direction et la vitesse de l'objet ;
- un traitement dit de niveau intermédiaire impliquant la forme, la texture et le groupement de l'objet ;
- un traitement dit de haut niveau qui concerne la reconnaissance et la catégorisation de l'objet.

La compréhension des processus neuronaux engagés dans le phénomène de fusion binoculaire permet de comprendre l'enjeu quant au débat sur le niveau cortical où se résout le conflit lors du phénomène de rivalité binoculaire évoqué au chapitre II.2.

Résumé : L'organisation anatomo-fonctionnelle des voies visuelles révèle que le traitement de l'information d'un stimulus visuel résulte d'un processus complexe. Il faut toutefois retenir, que les signaux en provenance des deux yeux sont séparés jusqu'à ce qu'ils rejoignent l'aire visuelle primaire. De plus, selon les caractéristiques des stimuli, l'information semble atteindre différents niveaux corticaux. Ainsi, des stimuli uniquement caractérisés en termes de contraste seraient traité à un niveau précoce alors que des stimuli soumis à interprétation (reconnaissance, catégorisation) seraient traités à plus haut niveau cortical.

I.2. Fusion motrice et sensorielle

La fusion sensorielle ne peut opérer sans que les yeux ne convergent précisément sur un objet par le biais de la fusion motrice et notamment la vergence fusionnelle via les

muscles oculomoteurs (Howard, 2012). La fusion motrice, quant à elle, ne peut se faire de manière précise qu'en cas de cibles sensoriellement fusionnables (Jones, 1980).

A tout point de la rétine de l'œil droit, correspond un point sur la rétine de l'œil gauche. Ces points sont dits correspondants (Hering, 1942 ; Howard et Rogers, 2012 ; Purves, 2004). Ainsi, à un point de la rétine temporale droite correspond un point de la rétine nasale gauche. Pour un angle de vergence donné, l'ensemble des localisations de l'espace dont les images se forment sur des points correspondants des deux rétines forme l'horoptère théorique (ou cercle de Vieth-Müller) (Figure 11). Décrivant un cercle parfait, il passe par le centre optique de chaque œil (Howard et Rogers, 2012). Les images sur l'horoptère ont alors une disparité binoculaire nulle. Les images d'un objet qui ne reposent pas sur l'horoptère tombent sur des points rétinien non correspondants, on dit alors qu'il y a une disparité binoculaire. Un objet plus près de l'horoptère produit une disparité croisée alors qu'un objet plus loin produit une disparité homonyme (Howard et Rogers, 2012). Pour un point de fixation donné, la zone dans laquelle les images d'un objet sont vues simples, malgré leur disparité binoculaire, est appelée aire spatiale de Panum. Ces images sont donc fusionnées. Lorsque les images d'un objet se trouvent en dehors de cette zone, du fait de leur disparité binoculaire et/ou rétinienne trop grande, elles apparaissent doubles. Le passage de la fixation d'un objet A, dans l'espace de Panum, à un objet B, en dehors de cet espace, modifie la disparité rétinienne et stimule la vergence dite fusionnelle. Il semble que cette réponse à la disparité ne soit pas régie par un processus de contrôle unique mais par deux processus de contrôle différents. Le premier est dit « transitoire » et donne lieu à une réponse motrice rapide et préprogrammée alors que le second dit « soutenu » est plus lent et donne lieu à une réponse motrice amenant les yeux à la position finale et précise de vergence (Neveu, 2012 ; Semmlow et Yuan, 2002). Alors que la composante transitoire semble initier la fusion motrice que la cible soit fusionnable sensoriellement ou non, la composante soutenue sert à son maintien (Jones, 1980). Cette dernière ne répond cependant qu'en cas de petites disparités (limitées à l'aire spatiale de Panum) et de cibles fusionnables (Semmlow, Hung, et Ciuffreda, 1986). En effet, si la fusion sensorielle n'est pas possible, les axes visuels reviennent à leur position de repos.

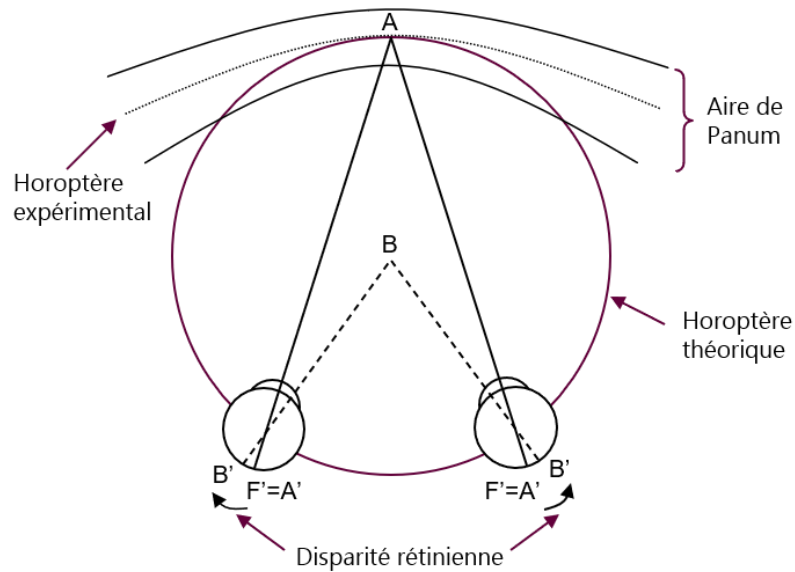


Figure 11 : Notions d'horoptère et aire de Panum

Les points « F' » correspondent aux fovéas de chaque œil. Lorsque les yeux sont alignés grâce à la vergence fusionnelle sur l'objet « A », l'image rétinienne « A' » est sur la fovéa de chaque œil. L'objet « B », en dehors de l'aire de Panum, est vu double (Neveu, 2012).

La présence de deux capteurs que sont les yeux permet la redondance de l'information et la distance qui les sépare permet, entre autres, l'augmentation du champ visuel total. Cette distance, qui est en moyenne de plus de six centimètres chez l'adulte et appelée distance inter-pupillaire, fait que les deux yeux ne captent pas exactement la même image de la scène d'intérêt. La différence entre l'image captée par l'œil droit et celle captée par l'œil gauche est appelée disparité binoculaire et est interprétée par le cerveau via la fusion sensorielle, comme du relief. Elle permet de réaliser l'estimation des distances entre les objets et facilite leur discrimination et leur reconnaissance dans une scène visuelle (Howard et Rogers, 2012).

Résumé : La fusion binoculaire est composée de la fusion motrice qui garantit l'alignement des axes visuels de chaque œil sur l'objet fixé et de la fusion sensorielle dont le traitement cortical associe ces deux images pour n'en former qu'une. Cette dernière est déclenchée par les images provenant de chaque rétine qui doivent être suffisamment semblables pour être garantie.

II. Rivalité binoculaire

La présentation de deux images dissemblables à des régions correspondantes des deux yeux qui ne peuvent être fusionnées conduit au phénomène de rivalité binoculaire (Brown et Norcia, 1997).

Les principes fondamentaux de la rivalité binoculaire seront détaillés dans une première partie (voir paragraphe II.1.1). Y seront également présentées des études psychophysiques évaluant la dynamique de la rivalité binoculaire en fonction des conditions d'affichage (voir paragraphe II.1.2).

La plupart des études sur la rivalité binoculaire se consacrent à déterminer si le processus neuronal où se résout la rivalité a lieu à un bas niveau cortical ou à haut niveau. La troisième partie de ce chapitre rapporte les arguments à l'hypothèse d'un conflit entre les deux yeux tout d'abord (voir paragraphe II.2.1). Puis sont présentés les études qui argumentent en faveur d'une hypothèse d'un conflit entre les deux stimuli (voir paragraphe II.2.2). Les études ayant des arguments en faveur d'un processus attentionnel résolvant le conflit seront ensuite détaillées (voir paragraphe II.2.3). Enfin, une compréhension des mécanismes sera résumée par le biais de modèles qui permettent de rendre compte d'un phénomène pouvant être résolu à plusieurs niveaux corticaux (voir paragraphe II.3).

II.1. Dynamique de la rivalité binoculaire

Lorsque sont présentées aux régions rétiniennes correspondantes des deux yeux, deux images dissemblables, le cerveau peut ne plus être en mesure de les fusionner. Il en résulte le phénomène de rivalité binoculaire.

II.1.1. Principes fondamentaux

La rivalité binoculaire correspond au phénomène produit par la présentation de deux images dissemblables aux régions rétiniennes correspondantes des deux yeux. La perception résultante peut alors prendre deux formes. L'image captée par l'un des yeux peut être totalement supprimée (Blake et Logothetis, 2002 ; Hershberger et Guerin, 1975). Généralement, cela conduira à une alternance de perception impliquant qu'une image sera perçue exclusivement. Une image mixte, composée de patches des stimuli gauche et droit simultanément, s'apparentant à une mosaïque peut également être perçue. Mais généralement, des stimuli de faibles dimensions (moins de 2°) généreront plus de perception exclusive que des stimuli de grande dimension qui eux généreront plus de rivalité mixte (Alais et Blake, 1999 ; Blake, O'Shea, et Mueller, 1992 ; Kang, Heeger, et Blake, 2009 ; Kovács et al., 1996) (Figure 12). Dans les deux cas, l'image ou une partie de l'image de l'œil droit et celle de l'œil gauche peuvent être vues alternativement (Blake, 1998 ; Häkkinen, 2004 ; Levelt, 1965).

Avant ce changement, qui n'apparaît pas avant 150 ms (Wolfe, 1983), les deux images se superposent (phénomène appelée fusion anormale) (Figure 12).

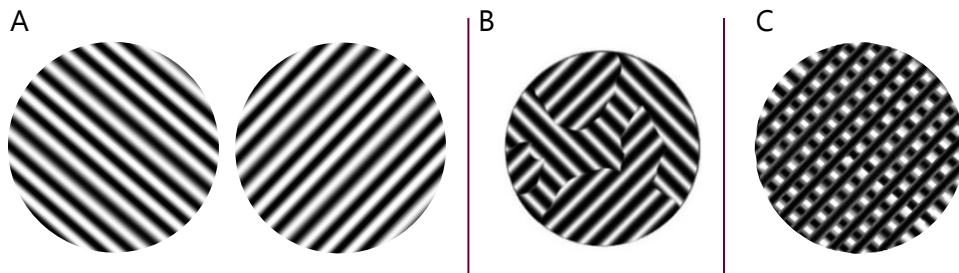


Figure 12 : Images dichoptiques, perception mixte et fusion anormale

Les stimuli de l'image (A) génère de la rivalité binoculaire s'ils sont présentés devant chacun des deux yeux. Ils peuvent, être vus alternativement et exclusivement mais également générer une perception mixte (B) ou générer une fusion anormale (C).

Des images simples composées de barres peuvent être présentées mais également des images plus complexes. La perception de la Figure 13 vue avec des lunettes anaglyphes résultera d'une alternance entre des morceaux des deux images.

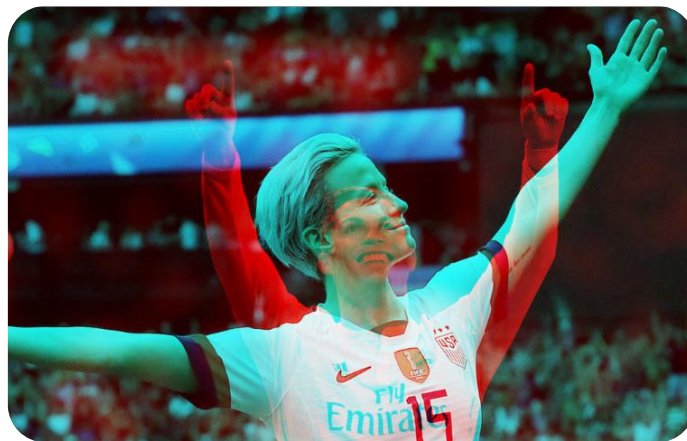


Figure 13 : Exemple de stimuli complexes générant de la rivalité binoculaire

Muni de lunettes anaglyphes rouge/cyan, ces deux images de footballeurs vont sembler alterner perceptuellement.

Les alternances se font de façon transitoire, quelle que soit la taille du stimulus comme l'ont montré Wilson et al. (2001). Dans cette étude, sont présentées deux motifs fixes de forme spirale, chacun dans un anneau (Figure 14).

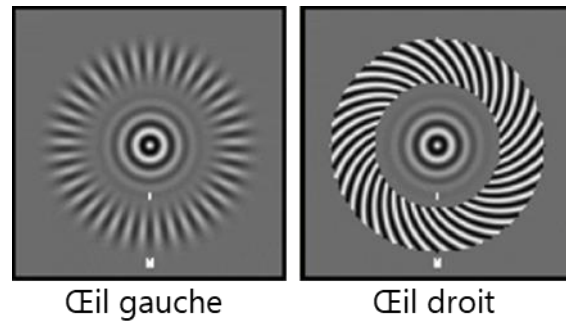


Figure 14 : Stimuli présentés dans l'étude de Wilson et al. (2001)

Le contraste d'un des deux motifs est baissé graduellement (en moyenne les participants ont atteint entre 15 et 25 % de contraste) afin qu'il puisse être supprimé de la perception du participant. Par l'appui d'une touche, ce dernier doit indiquer lorsque le contraste est assez bas pour que l'autre stimulus devienne exclusivement dominant. Dès l'appui, le contraste d'une partie du motif supprimé est augmenté selon huit emplacements cardinaux équidistants. Dès que cette portion de motif devient à son tour dominante, le participant doit relâcher la touche. Est enregistré le temps de transit entre les deux appuis. Il est montré que plus l'excentricité de la zone rivale est grande, plus la transition est lente impliquant un renversement transitoire de la dominance d'un des stimulus (Figure 15).

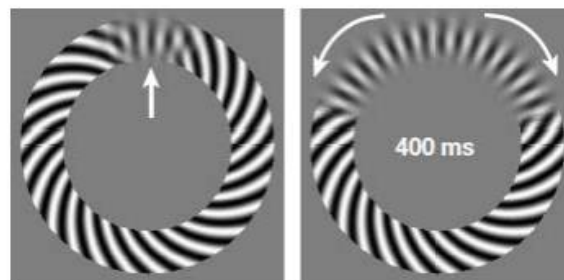


Figure 15 : Transition du renversement de la perception sous forme d'ondes

Chaque image représente la perception résultante de la projection des images de la Figure 14 à deux instants. L'image de gauche représente la perception exclusive de l'image présentée à l'œil gauche dès la diminution de contraste. La flèche blanche représente l'endroit où cette diminution a été effectuée. L'image de droite représente la propagation de la dominance du stimulus de l'œil droit sur le stimulus de l'œil gauche (Figure 14) 400 ms après la diminution du contraste. Le point central commun aux deux yeux permettant la fixation (Figure 14) n'est pas affiché dans ces figures (Wilson, Blake, et Lee, 2001).

Les durées de perception exclusives sont aléatoires, parfois régies en fonction de certains paramètres. Dans la plupart des études évaluant la perception exclusive de chaque image, les résultats montrent que la distribution des durées de perception exclusive suit une distribution gamma (Figure 16) (Carmel et al., 2010 ; Fox et Herrmann, 1967 ; Leopold et Logothetis, 1996 ; Levelt, 1965) mais chaque phase de dominance se veut indépendante des autres (Walker, 1975). Cela signifie que la durée de la précédente période de perception exclusive d'une image ne permet pas de prédire la suivante. Les paramètres de la fonction

gamma différent entre les observateurs pour un même stimulus (Figure 16A) et différent entre deux stimuli (paires d'images rivales). Par exemple, la présentation de deux images qui diffèrent en termes de contraste augmentera la dominance de perception exclusive de l'image la plus contrastée conduisant à une distribution gamma avec une médiane plus élevée (Figure 16B).

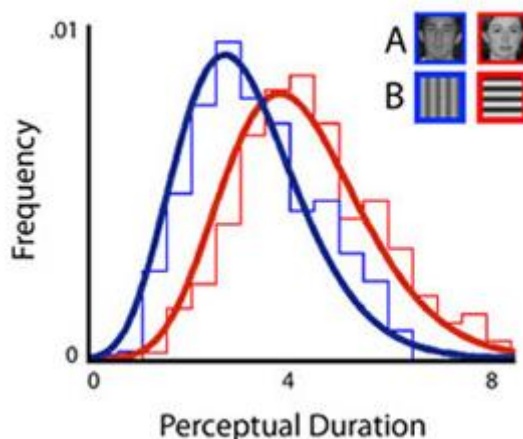


Figure 16 : Distributions gamma des durées de dominance

Les histogrammes représentent les durées de dominance, et les courbes représentent les distributions gamma des données de chaque couleur. Les mêmes distributions illustrent deux ensembles différents de mesures possibles : (A) les résultats de deux observateurs différents en réponse aux mêmes stimuli ; ou (B) l'effet des différentes caractéristiques de stimulus sur leur durée de perception exclusive. Dans ce cas, le réseau encadré en rouge présente un contraste plus élevé, ce qui entraîne des durées moyennes de dominance plus longues et donc une distribution gamma avec une médiane plus élevée (Carmel et al., 2010).

Trois types de mesures permettent de rendre compte de la dynamique de la rivalité binoculaire :

- le taux d'alternance, qui correspond au nombre d'alternance de perception par unité de temps ;
- la prédominance, qui correspond à la proportion totale de temps pendant laquelle le stimulus a été dominant ;
- la durée moyenne de la dominance en seconde.

Généralement, pour évaluer la rivalité binoculaire, il est demandé à un participant d'appuyer sur le bouton correspondant à l'image perçue. On parle alors de dominance exclusive de l'image perçue. Certaines études utilisent trois possibilités de réponse en ajoutant une mesure de perception mixte lorsqu'aucun bouton n'est pressé (Dieter, Sy, et Blake, 2017 ; Handa et al., 2006 ; Logothetis, Leopold, et Sheinberg, 1996).

Ces mesures sont valables lors de la présentation de stimuli dichoptiques, c'est-à-dire suffisamment différents dans leurs caractéristiques pour ne pas être fusionnés et chacun facilement identifiable par le participant. La rivalité binoculaire est expérimentée avec des

images simples telles que des lignes qui diffèrent par leur orientation comme évoquées précédemment (Blake, Westendorf, et Overton, 1980 ; Levelt, 1965) ou bien avec des stimuli plus complexes tels qu'un visage vu par un œil et une maison vue par l'autre par exemple (Figure 17) (Blake et O'Shea, 2017 ; Tong, Meng, et Blake, 2006). On notera, que la rivalité binoculaire peut se manifester également lorsque deux images dichoptiques sont présentées l'une après l'autre très rapidement (espacées de 100 ms) (Yang, Blake, et McDonald, 2010).

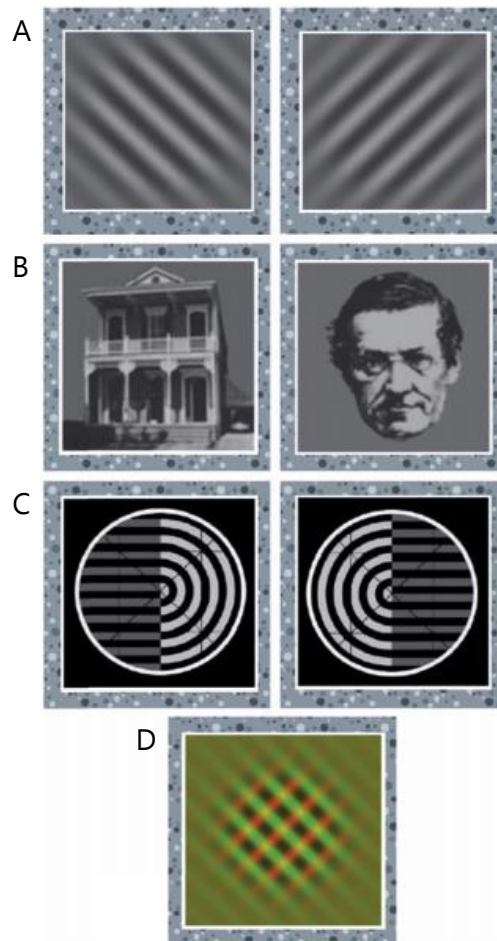


Figure 17 : Stimuli qui, affichés dans chaque œil, provoquent de la rivalité binoculaire

Les stimuli A (motifs orthogonaux) B (visage et maison) et C (paire de stimuli complémentaires) génèrent de la rivalité binoculaire s'ils sont présentés à chacun des deux yeux (Alais et al., 2000). Le stimuli D (motifs superposés orthogonaux de couleur différente) provoque de la rivalité monoculaire où l'alternance entre les deux motifs se fait même s'ils ne sont pas séparés dans chacun des yeux (Blake et O'Shea, 2017).

Résumé : La rivalité binoculaire se produit par la présentation d'images dichoptiques présentées aux régions correspondantes des deux rétines. Le fait qu'une partie ou l'entièreté d'une image puisse disparaître de la perception fascine. Le taux d'alternance, la prédominance et la durée moyenne permettent de mesurer ce phénomène. Ces mesures seront fonctions des individus et des stimuli affichés

II.1.2. Etudes psychophysiques évaluant la dynamique de la rivalité binoculaire

L'objectif principal des études sur la rivalité binoculaire est de déterminer comment les changements de perception sont liés aux paramètres des stimuli. Généralement, les caractéristiques physiques des stimuli dichoptiques varient, tout en évaluant le taux d'alternance et/ou la prédominance et/ou la durée moyenne de la dominance. Bien que ces paramètres soient fonction de l'individu (Levelt, 1965), en général, l'image sélectionnée par le cerveau a un impact plus ou moins important. Selon Levelt (1965), la « force » des stimuli rivaux peut être modulée en ajustant le contraste, la densité et le flou des contours des stimuli. Il énonce alors quatre hypothèses. La première consiste à dire qu'augmenter la force d'un stimulus augmentera sa prédominance perceptive. La deuxième consiste à dire qu'augmenter la force du stimulus dans un œil diminue principalement la durée moyenne de dominance de l'autre œil (tandis que celle de l'œil dont la force est augmentée reste quasi-constante). La troisième hypothèse concerne le taux d'alternance qui augmentera avec l'augmentation de la force d'un stimulus. La quatrième hypothèse consiste à dire qu'augmenter la force des deux stimuli rivaux conjointement augmentera également le taux d'alternance.

Cependant, sur la base des résultats de certaines études, notamment évoquées par Brascamp et al. (2015) dans leur revue sur les lois de Levelt (1965), les deuxièmes et troisièmes hypothèses ont été reformulées et corrigées. Ainsi, la deuxième proposition implique que c'est d'augmenter la différence de force entre les deux stimuli qui augmentera la durée moyenne de dominance du stimulus le plus fort. Quant à la troisième proposition, augmenter la force d'un stimulus ne fera pas augmenter le taux d'alternance mais augmenter la différence de force entre les deux réduira le taux d'alternance. Ces propositions impliquent des stimuli de petite taille et ne s'appliquent pas systématiquement avec des stimuli de grande taille (Meng et Tong, 2004).

D'autres travaux, qui ont comparé des paires de stimuli, ont montré que ceux qui présentent un contraste élevé conduisent à un taux d'alternance plus élevé que ceux qui présentent un contraste plus faible (Hollins, 1980 ; Liu, Tyler, et Schor, 1992).

Lorsque les deux images diffèrent en termes de contraste, celle qui présente un contraste plus élevé domine et le taux d'alternance augmente par rapport à la condition où le contraste des deux images est le même (Blake et Camisa, 1978 ; Brascamp, Klink, et Levelt, 2015 ; Carmel et al., 2010 ; Levelt, 1965). De même, le stimulus le plus lumineux dominera (Peli, 1990) et un stimulus en mouvement dominera par rapport à un stimulus stationnaire (Norman, Norman, et Bilotta, 2000). La prévisibilité de l'image affecte la dominance initiale (il s'agit de la première image vue exclusivement). Un stimulus qui a déjà été vu auparavant dominera sur un autre qui ne l'a pas été (Denison, Piazza, et Silver, 2011). Hollins et Leung (1978), cités par Patterson et al. (2007) ont montré que la couleur affecte également la rivalité binoculaire. Ainsi, la perception exclusive de stimuli de courte longueur d'onde (455 nm) était

faible (plus grande rivalité mixte) comparés à des stimuli de longueurs d'onde plus grandes et l'effet devenait plus apparent à mesure que la différence de longueur d'onde entre deux stimuli augmentait (moins de perception mixte).

Dans l'étude de Wolfe (1983), il est présenté des barres verticales sur l'œil gauche et des barres horizontales sur l'œil droit dont la fusion forme un réseau orthogonal. Ils sont présentés entre 10 et 1000 ms. Les participants devaient évaluer par un score entre 0 et 5, la fusion des stimuli. Un score de 5 était attribué lorsque les stimuli étaient fusionnés et 0 lorsqu'ils étaient en rivalité. Il est montré, dans cette étude, que deux stimuli dichoptiques avec une luminance moyenne plus élevée (2,6 unités log) étaient perçus avec plus de rivalité que deux stimuli de luminance moyenne plus faible (0,6 log unités). De plus, l'étude a montré que les stimuli ayant des hautes fréquences spatiales (16,4 cycles/deg) étaient plus souvent fusionnés que ceux ayant des basses fréquences spatiales (3,8 cycles/deg).

Dans l'étude d'O'shea et al. (1997), il était également présenté des barres horizontales dans un œil et verticales dans l'autre œil. Six fréquences spatiales ont été testées (0,5 ; 1 ; 2 ; 4 ; 8 ou 16 cycles/deg) et plusieurs diamètres de stimulus (0,5 ; 1 ; 2 ; 4 ou 8°). Il était demandé aux participants d'indiquer leur perception en appuyant sur un bouton. Lorsque le participant ne voyait que des barres horizontales, il appuyait sur le bouton de droite. Lorsqu'il ne voyait que des barres verticales, il appuyait sur le bouton de gauche. Lorsqu'il percevait un mélange des deux, il n'appuyait sur aucun bouton. Les données recueillies étaient : le temps cumulé de perception exclusive, le nombre de boutons enfoncés par minute et le temps de perception mixte. Les résultats ont montré que les fréquences spatiales élevées correspondaient à un plus grand nombre de perceptions mixtes que les fréquences spatiales basses. Il a également été confirmé que des stimuli plus étendus génèrent plus de perceptions mixtes.

Résumé : Les études psychophysiques montrent qu'il est possible d'impacter le taux d'alternance, la prédominance et la durée moyenne de perception exclusive en modifiant les paramètres des stimuli. Deux stimuli de fort contraste provoqueront plus d'alternance que ceux à faible contraste. Deux stimuli ayant des hautes fréquences spatiales généreront moins de rivalité et plus de perception mixte comparés à des stimuli en basses fréquence spatiale. De plus, lorsque sont présentés deux stimuli dichoptiques, l'augmentation de la force d'un des deux va impacter le taux d'alternance et la prédominance du stimulus le plus fort. Est considéré comme stimulus le plus fort, celui qui a un plus haut contraste ou une luminance moyenne plus élevée ou celui en mouvement ou encore celui qui a déjà été vu auparavant.

II.2. Mécanismes neurophysiologiques de la rivalité binoculaire

La littérature sur la rivalité binoculaire est composée de plusieurs théories et controverses. Les principales questions portent sur ce qui rivalise pendant le phénomène. Est-ce une compétition entre les deux sources monoculaires ou bien entre les deux stimuli perçus ? De cette résolution du conflit dépend également le niveau cortical où la rivalité semble se faire. A-t-elle lieu au niveau du CGL, du cortex primaire ou bien à un niveau cortical plus élevé ? Pour répondre à ces questions, des études psychophysiques et neurophysiologiques ont été menées.

Historiquement, il était défini que la rivalité binoculaire était un phénomène d'alternances de perception induites par des interactions inhibitrices de groupes de neurones monoculaires innervés séparément par les deux yeux (CGL et couche IV du cortex primaire) (Blake, 1989 ; Polonsky et al., 2000 ; Tong et Engel, 2001 ; Verhoeff, 1935). Ainsi était-ce la compétition entre les deux sources monoculaires qui impactait la perception. Cette hypothèse fera l'objet d'une première partie de ce chapitre (voir paragraphe II.2.1). Il y sera décrit les études qui argumentent en sa faveur.

Toutefois, rapidement il a été mis en évidence que la dynamique de la rivalité binoculaire peut être influencée par la manipulation de stimuli simples tels qu'une modification du contraste ou de la densité des contours ou encore de la propriété même des images plus complexes (Blake et Camisa, 1978 ; cités par Howard et Rogers, 2012 ; Hollins, 1980 ; Levelt, 1965). Les arguments en faveur d'une compétition entre les stimuli plutôt qu'entre les deux yeux seront décrits dans la seconde partie de ce chapitre (voir paragraphe II.2.2).

Une troisième hypothèse quant à la résolution du conflit a été émise par Helmholtz (1924) qui considère que le phénomène de rivalité binoculaire comme toute autre perception bistable, résulte d'un mécanisme de sélection attentionnelle. Les études évaluant l'impact de l'attention sur la rivalité binoculaire sont présentées dans une troisième partie de ce chapitre (voir paragraphe II.2.3).

II.2.1. Hypothèse d'une compétition oculaire impliquant une résolution à bas niveau cortical

L'hypothèse de la compétition oculaire soutient que la rivalité binoculaire est résolue au niveau monoculaire, peut-être par inhibition réciproque entre des pools de neurones monoculaires de V1. Il y aurait ainsi une concurrence à un stade précoce entre les voies visuelles monoculaires (Blake, 1989). L'évaluation de l'impact de la dominance oculaire est donc à prendre en compte dans le cas d'une concurrence entre les deux yeux.

Ce point de vue est corroboré par des études comportementales qui montrent qu'à la présentation de stimuli rivaux, un changement visible au sein d'un des deux peut passer

complètement inaperçu pendant plusieurs secondes pendant des phases de suppression. Ceci implique que la suppression n'est pas impactée par l'interprétation du stimulus (Blake et Fox, 1974 ; Blake et O'Shea, 2017 ; Blake et al., 1998). Partisans de cette première hypothèse, Blake et al. (1989 ; 1980) aboutissent à une conclusion similaire puisque lorsqu'une permutation est réalisée entre les stimuli rivaux, la perception sera inversée. Par exemple, des barres verticales sont présentées à l'œil droit et des barres horizontales à l'œil gauche. Si le stimulus dominant est celui de l'œil droit (barres verticales), lorsque sont échangés les deux stimuli (les barres horizontales sont présentées devant l'œil droit et les barres verticales devant l'œil gauche), la perception change et le stimulus dominant est celui composé de barres horizontales présenté à l'œil droit. L'œil « dominant » restant le même. Ils supposent alors qu'il s'agit d'une compétition entre deux sources monoculaires plutôt qu'une rivalité de stimulus (Blake, 1989 ; Blake, Westendorf, et Overton, 1980).

Afin d'étayer davantage ces affirmations, des recherches en imagerie médicale ont été menées. Lors de l'étude menée par Haynes et al. (2005), il s'agissait d'évaluer l'activité du CGL et du cortex visuel primaire (V1) en présence d'images dichoptiques induisant de la rivalité binoculaire. Il a été présenté aux participants un motif composé de barres verticales rouges et noires à l'œil gauche et un motif composé de barres horizontales bleues et noires à l'œil droit tandis que les deux stimuli tournaient simultanément dans le sens horaire (Figure 18). Ils étaient vus à travers des lunettes anaglyphes rouges/bleues, de sorte que l'image bleue soit visible par l'œil droit et l'image rouge par l'œil gauche.

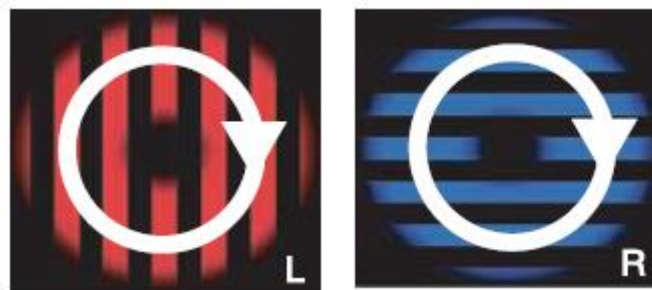


Figure 18 : Stimuli présentés dans l'étude Haynes et al. (2005)

Les participants devaient indiquer continuellement à l'aide de touches réponse, quel motif ils percevaient pendant les cinq minutes de la stimulation tandis qu'une imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) à haute résolution était réalisée. Il a ainsi été montré que certaines régions du CGL et du cortex visuel primaire s'activaient ou se désactivaient parallèlement à la perception ou la suppression du stimulus (Figure 19).

Cette étude montre également que, chez l'Homme, le CGL est à l'origine d'un traitement visuel impliquant notamment une dominance et une suppression oculaires (Haynes, Deichmann, et Rees, 2005). D'autres études d'IRMf (Polonsky et al., 2000 ; Tong et Engel, 2001) confirment également la corrélation entre les modifications de l'activité au sein de V1 et les changements perceptifs observés.

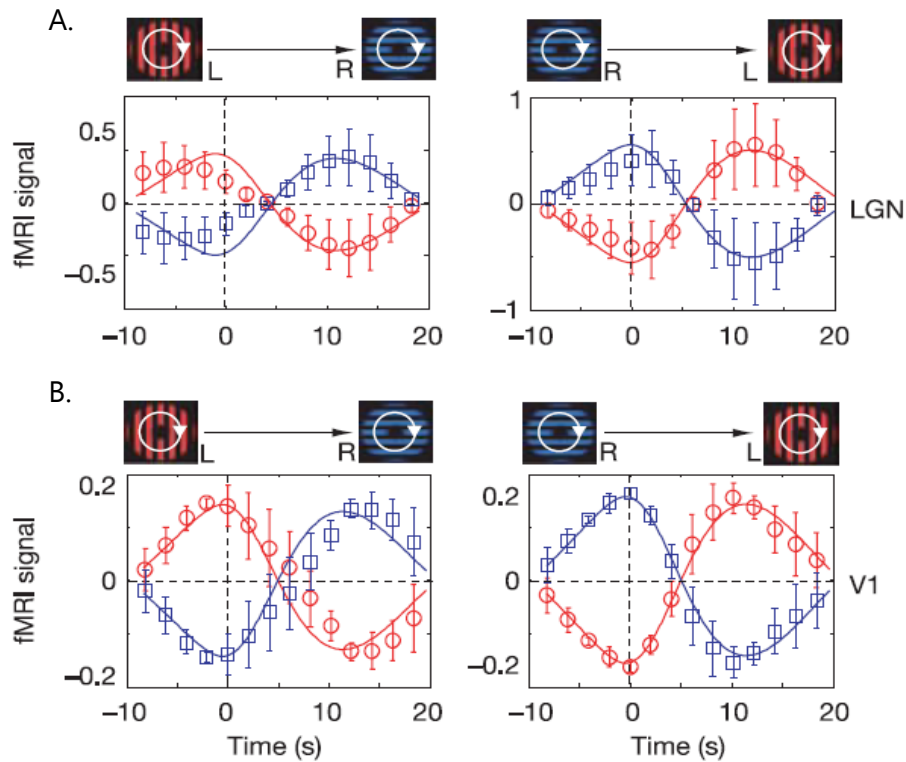


Figure 19 : Résultats de l'IRMf obtenus dans l'étude de Haynes et al. (2005)

L'IRMf-BOLD permet de déterminer le niveau d'oxygénation cérébrale de chaque CGL (A) et du cortex visuel primaire (B). Sont représentés sur ces graphiques, les différences de moyennes des signaux BOLD entre les quatre participants à l'étude centrées sur les transitions perceptives du rouge au bleu (à gauche) et du bleu au rouge (à droite). Les barres d'erreur représentent l'erreur type entre les participants.

L'analyse des signaux mesurés par encéphalographie (EEG) réalisée par O'Shea et al. (2013) a permis de montrer qu'une activité élevée au sein des neurones de bas niveau (dans le CGL et V1) est observée lors du traitement de stimuli rivaux. Etude Dans cette étude, des stimuli dichoptiques étaient présentés aux deux yeux pendant une seconde. Devant l'œil droit étaient affichées des barres horizontales tandis que des barres verticales étaient affichées devant l'œil gauche. Après une seconde de présentation, elles étaient retirées pendant 200 ms, laissant une image de fond noir avec des informations permettant la fusion telles qu'une croix de fixation centrale et des anneaux. Les stimuli dichoptiques étaient ensuite affichés de nouveau pendant une seconde (Figure 20).

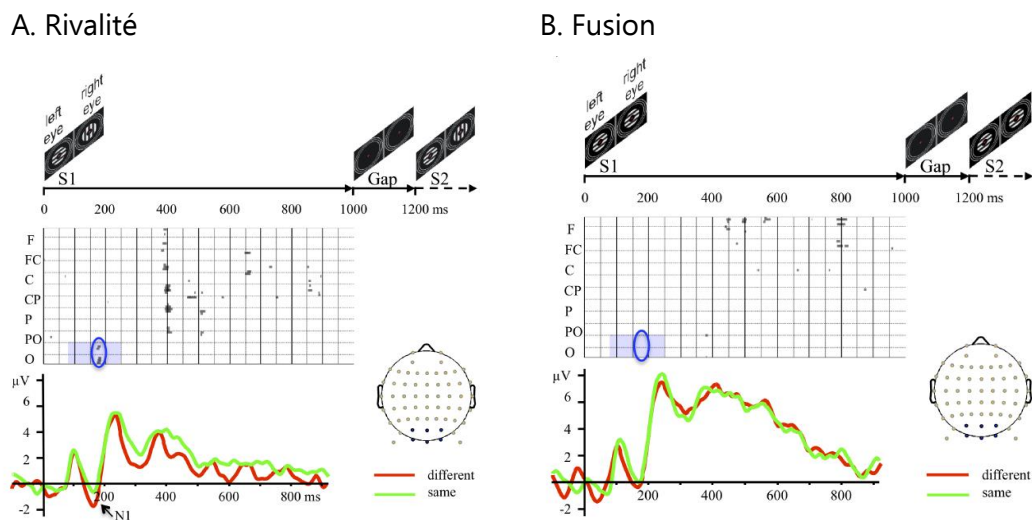


Figure 20 : Stimuli et résultats issus de l'étude d'O'Shea et al. (2013)

Il est présenté les évènements selon une condition rivalité (A) et une condition fusion (B) et les potentiels évoqués liés à ces évènements. Les différences d'activité aux électrodes sont représentées dans l'ovale bleu. Elles décèlent une activité prédictive dans les lobes pariéto-occipital et occipital 180 ms après la présentation des stimuli. Une activité des groupes d'électrodes pariétales et centrales est observée également 400 ms après la présentation. Chaque graphique représente les potentiels évoqués en rouge quand la perception a changé et en vert quand elle est restée la même.

Les participants ont été interrogés sur leur perception de l'orientation du stimulus dominant avant et après l'intervalle de 200 ms (durant lequel seuls un fond noir et des informations pouvant être fusionnées étaient visibles). Ils devaient également indiquer si l'orientation du stimulus dominant avait changé entre les deux présentations. Les résultats de l'EEG ont montré qu'en présence des stimuli dichoptiques, si changement de stimulus dominant il y avait, les électrodes placées sur le lobe pariéto-occipital et occipital étaient activées 180 ms après la première présentation (Figure 20), résultant d'une prédiction d'alternance. Bien que ces résultats aident à prédire si un conflit oculaire va se produire, ils en disent peu sur la dynamique de la rivalité binoculaire.

L'étude de Brown et Norcia (1997) corrobore ces résultats. En effet, il a été enregistré les potentiels évoqués du lobe occipital via un EEG pendant la présentation de stimuli dichoptiques de 12°. Il était présenté devant l'œil droit des barres orientées à 45° et devant l'œil gauche, des barres orientées à 135°. Les participants devaient indiquer, à l'aide de touches réponse, leur perception d'un stimulus ou l'autre ou d'aucun par le relâchement des deux boutons. Les résultats montrent une étroite corrélation entre les potentiels évoqués et la perception des participants (Figure 21). Ces mesures au sein du lobe occipital, lieu renfermant l'aire visuelle primaire, montrent bien une activité pendant la rivalité binoculaire impliquant un traitement de bas niveau mais n'excluent pas un traitement de haut niveau.

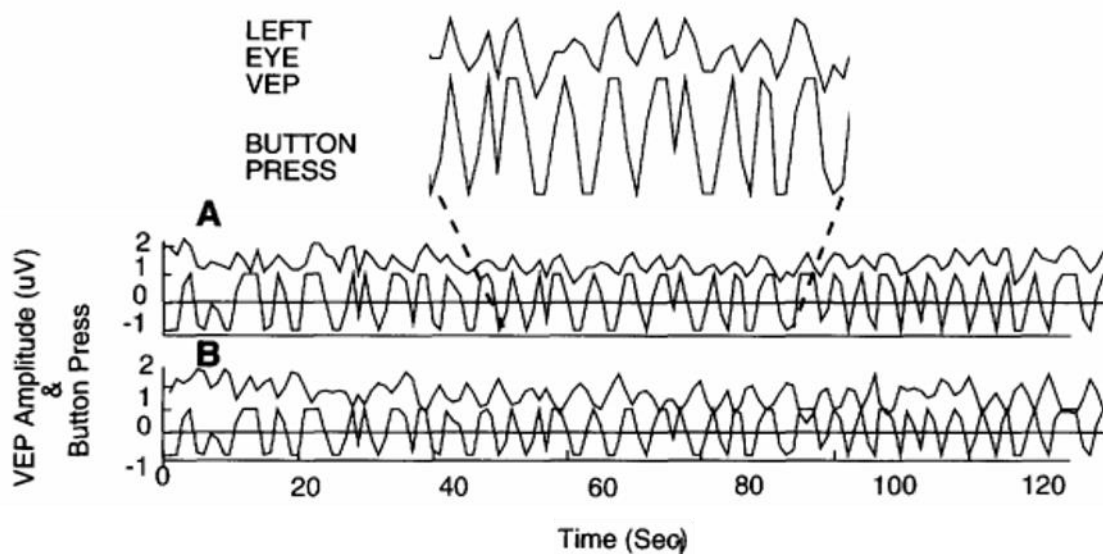


Figure 21 : Potentiels évoqués mesurés par des électrodes placés sur le lobe occipital d'un sujet dans l'étude de Brown et Norcia (1997)

Les courbes les plus hautes des graphiques A et B représentent l'amplitude des potentiels évoqués lorsque l'image de l'œil gauche (graphique A) ou de l'œil droit (graphique B) dominait la perception. Les courbes en bas des deux graphiques sont identiques et représentent les appuis. Les données varient entre -1 (image droite dominante) et +1 (image gauche dominante).

Résumé : La synergie entre les mesures encéphalographiques (au sein des CGL et V1) et les alternances des stimuli rivaux montrent que la rivalité binoculaire est un phénomène qui pourrait se résoudre à bas niveau cortical. Or, ces études utilisent des stimuli simples qui ne peuvent subir un traitement de plus haut niveau comme le feraient des stimuli plus complexes.

II.2.2. Hypothèse d'une compétition des stimuli impliquant une résolution à haut niveau cortical

Bien qu'il existe une littérature importante qui soutient l'existence d'une concurrence entre les deux yeux, d'autres études psychophysiques sont en faveur d'une compétition ayant lieu à un niveau cortical plus élevé.

Ainsi, par exemple, Logothetis et al. (1996) puis Silver et Logothetis (2007) ont soutenu que si l'hypothèse de compétition oculaire était vraie, la commutation rapide des stimuli entre les deux yeux devrait entraîner un changement rapide de la perception lorsque des motifs orthogonaux ayant des orientations différentes sont présentés devant chaque œil. Ce type de changement avait été testé dans l'étude de Blake et al. (1980) et résultait d'un changement de perception (II.2.1). Cependant, dans leur étude, Logothetis et al. (1996) ont constaté que le changement perceptif était lent, ce qui implique que les alternances ne peuvent être dues à une rivalité entre les yeux. Cela suggère que la rivalité binoculaire

pourrait, en fin de compte, être un phénomène de haut niveau qui s'étend au-delà du traitement monoculaire (Walker, 1978).

Les résultats de Logothetis et al. (1996) ont été contestés par Kovács et al. (1996), qui ont soutenu que l'émergence de la rivalité binoculaire était simplement initiée par la suppression oculaire, et que l'inertie de cette dernière empêchait la synchronisation de l'alternance de la perception avec l'alternance des stimuli. De même, Lee et Blake (1999) ont remis en question la méthodologie de Logothetis et al. (1996) en faisant valoir que même si la rivalité "oculaire" était réellement présente, les participants n'auraient pas été en mesure de répondre avec précision étant donnée la fréquence de l'alternance (trois par seconde). En outre, ils avancent que l'alternance lente générée par le changement rapide des stimuli d'un œil sur l'autre ne se produisait que dans une gamme très limitée de fréquences spatiales et temporelles, ce qui laisse supposer qu'il s'agit d'un cas particulier.

L'étude de Kovács et al. (1996) est néanmoins un autre exemple qui s'inscrit en désaccord avec le postulat que la rivalité binoculaire résulte d'une simple inhibition entre les neurones monoculaires. Dans cette étude, si la théorie de la compétition entre les deux yeux est la seule qui puisse expliquer le phénomène, chaque paire d'image devrait résulter d'une alternance entre les deux images (Figure 22). Or, avec les paires B de la Figure 22, il est observé, comme avec les paires A, une alternance entre l'image du singe et celle du texte. On parle alors de « regroupement interoculaire » qui peut être expliqué uniquement par la cohérence des motifs. Ce ne peut donc pas être uniquement la compétition entre les deux yeux qui résulte d'une telle perception mais bien la structure même des stimuli.

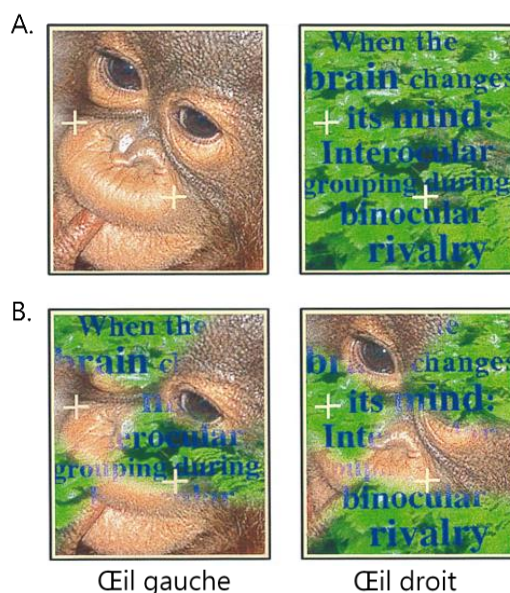


Figure 22 : Paires de stimuli de grande taille (6°x6°)

La perception de ces deux paires de stimuli résultent d'une alternance de l'œil gauche et de l'œil droit (A) et d'une alternance mixte entre les deux images (B). Le singe et le texte sont vus exclusivement dans les deux cas expliquant un conflit entre les stimuli plutôt qu'entre les deux sources monoculaires (Kovács et al., 1996).

Outre la modification des caractéristiques physiques des stimuli qui peut influencer la dynamique de la rivalité binoculaire, il a été montré qu'elle est dépendante également de l'interprétation des stimuli présentés. Son déclenchement serait en lien avec un processus neuronal situé à un niveau cortical élevé (Kovács et al., 1996 ; Logothetis, Leopold, et Sheinberg, 1996 ; Silver et Logothetis, 2007). Selon cette théorie, la rivalité binoculaire et la réversion lors de la présentation de figures ambiguës, résulteraient du même processus. En effet, il a été montré par Brascamp et al. (2005) que la distribution des phases de dominance évaluant la rivalité binoculaire est semblable à celle d'une perception bistable monoculaire (ou rivalité monoculaire). Dans cette étude, les phases de dominance ont été mesurées selon plusieurs paires de stimuli (Figure 23).

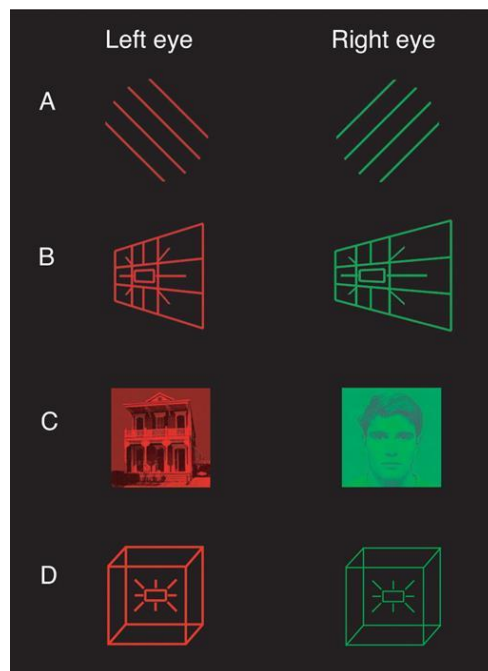


Figure 23 : Quatre paires différentes de stimuli : A) motifs orthogonaux, B) inclinaison bistable, C) maison-visage D) cube de Necker (Brascamp et al., 2005)

D'autre part, O'shea et al. (2009) ont comparé à travers plusieurs expérimentations, les caractéristiques communes entre la rivalité binoculaire et la rivalité monoculaire qui consiste à présenter deux images superposées (Figure 24).

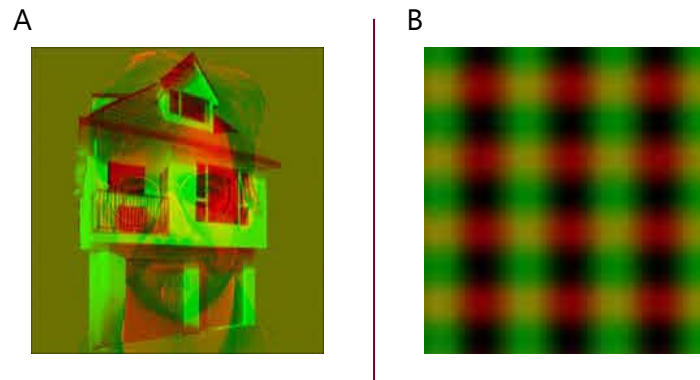


Figure 24 : Stimuli générant de la rivalité monoculaire

L'image (A) représente les stimuli utilisés dans l'étude d'O'Shea et al. (2009) et l'image (B) non issue de cet article, permet de mieux se rendre compte du phénomène. En fixant un point de cette image, les barres horizontales rouges vont alterner avec les barres verticales vertes.

Cette étude montre que la rivalité binoculaire et la rivalité monoculaire produites avec des images tout aussi complexes, sont affectées par la propriété des stimuli à savoir la taille et la couleur et impliquent des alternances aléatoires ainsi que des périodes de dominance exclusives indépendantes les unes des autres. Ces caractéristiques communes impliquent un processus neuronal de haut niveau commun impliqué dans la suppression des stimuli sans pour autant exclure le fait qu'il puisse avoir un processus de bas niveau impliqué dans la rivalité binoculaire.

Résumé : La résolution du conflit pour des stimuli plus grands et plus complexes que de simples barres, semble se faire à un niveau cortical plus élevé. Le fait qu'il existe des caractéristiques communes entre la rivalité binoculaire et la rivalité dite monoculaire qui ne nécessite pas une présentation à chacun des deux yeux, est un argument en ce sens. Le regroupement interoculaire est une autre preuve d'un conflit se résolvant plus haut dans le cortex visuel que pour des stimuli simples.

II.2.3. Hypothèse d'une sélection attentionnelle dans la résolution du conflit

« L'attention [...] est la prise de possession par l'esprit, sous une forme claire et vive, d'un objet ou d'un train de pensée parmi ce qui semble être plusieurs objets ou trains de pensée possibles simultanément [...] Elle implique le retrait de certaines choses pour s'occuper efficacement d'autres » (James, 1890).

Une autre alternative aux théories de compétition entre les stimuli ou entre les deux yeux, évoquée par Helmotz et Southall (1924), propose que toute forme de perception bistable résulte d'un mécanisme commun de sélection attentionnelle. S'opposent à cette théorie, Hering (1942) et Breese (1909) qui ont constaté que lorsque des stimuli dichoptiques sont présentés pour induire une rivalité binoculaire, le fait de maintenir l'attention sur un

stimulus n'augmente pas sa prédominance. Des études plus récentes ont donc cherché à montrer si l'attention pouvait avoir un impact sur la dominance initiale d'un stimulus et/ou sur la dynamique de la rivalité binoculaire.

L'alternance perceptive pourrait résulter d'un processus de haut niveau qui permet au cerveau de réévaluer constamment les informations sensorielles afin d'actualiser la perception (Leopold et Logothetis, 1999 ; Tong, 2003). Le lobe pariétal est responsable de l'intégration des informations provenant de différentes modalités sensorielles, telles que la vision, et cette région est particulièrement impliquée dans la perception de l'espace et l'attention. En effet, les zones fronto-pariétales impliquées dans l'attention seraient responsables du lancement des alternances perceptives par un processus descendant (*top down*) pour orienter le cortex visuel vers une représentation ou une autre (Leopold et Logothetis, 1999).

II.2.3.1. Attention endogène ou attention volontaire

L'attention endogène désigne l'attention qui est dirigée et contrôlée par l'individu. Dans le cas des stimuli dichoptiques, ce dernier essaie volontairement de maintenir sa perception sur un stimulus plutôt que sur l'autre.

L'effet de l'attention volontaire a été testé en perception bistable et en rivalité binoculaire. Les résultats révèlent un effet significatif de l'attention sur la prédominance lorsqu'est présenté le cube de Necker (la prédominance de la face du cube relevant de l'attention augmente entre 37 et 40 %) mais pas lorsque sont présentés deux stimuli rivaux en rivalité binoculaire (le temps de prédominance d'un stimulus relevant de l'attention augmente non significativement entre 5 et 13 %) (Meng et Tong, 2004).

Deux études neurophysiologiques montrent, via des méthodes d'imagerie fonctionnelle, une plus forte activité des zones fronto-pariétales lorsque l'attention volontaire est sollicitée à la présentation du cube de Necker par rapport à une visualisation passive (Tong et al., 2002) et au renversement du stimulus dominant plutôt que pendant une prédominance exclusive (Lumer, 1998). Ces résultats n'expliquent cependant pas le rôle causal de l'attention dans le processus d'alternance.

Meng et Tong (2004) ont également testé si l'attention volontaire peut modifier la dynamique de la rivalité binoculaire. Lorsqu'il a été demandé aux participants de tenter d'augmenter volontairement le taux d'alternance, ils y parviennent de manière significative lors de la présentation de stimuli de grande taille (5,1°) (Figure 25). Néanmoins, comme évoqué précédemment, la prédominance n'est pas modifiée de manière significative avec l'attention volontaire par rapport à une situation d'attention non sélective. Les auteurs ont conclu que l'attention volontaire peut avoir un impact sur le taux d'alternance mais ne peut pas aider à choisir un stimulus.



Figure 25 : Stimuli présentés dans l'étude de Meng et Tong (2004)

Ooi et He (1999) ont obtenu des résultats légèrement différents, car ils ont observé une augmentation de la prédominance d'un stimulus lorsque l'attention volontaire était dirigée vers lui. Les images utilisées dans cette dernière étude sont cependant très différentes de celles utilisées dans l'étude de Meng et Tong (2004) : le conflit est dynamique (le stimulus « traverse » la zone où l'attention volontaire est maintenue) (Figure 27), de très courte durée, limité à une petite zone du champ visuel (environ 1°).

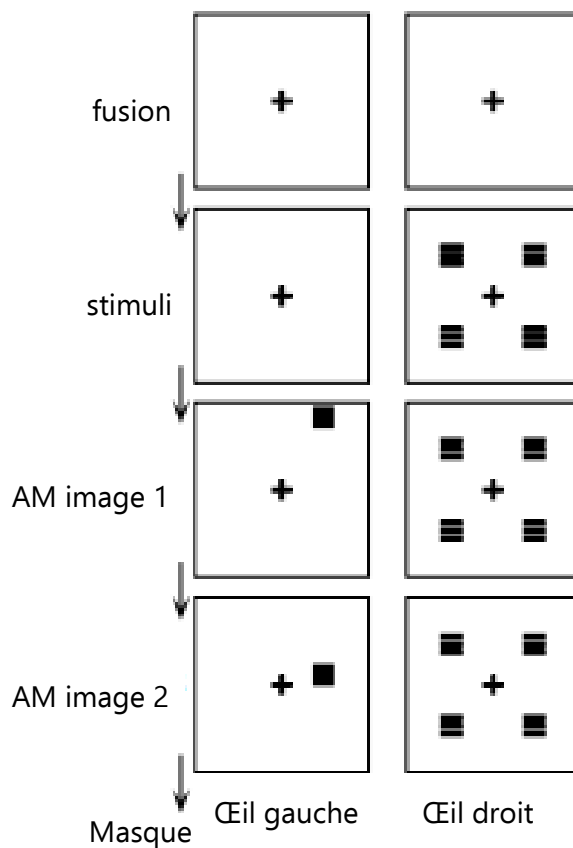


Figure 26 : Stimuli présentés dans l'étude d'Ooi et He (1999)

Un essai débute avec l'affichage d'une croix de fixation pendant 1 s aux deux yeux, suivie de quatre groupes de grilles affichés pendant 200 ms sur l'œil droit. Pendant la phase AM (*apparent-motion* ou mouvement apparent), deux carrés noirs sont présentés à l'œil gauche pendant 117 ms alternativement (correspondant aux images AM 1 et 2). L'essai se termine par la présentation d'un masque non présent sur cette figure. Les participants doivent indiquer à la fin de l'essai par l'appui d'une touche si les grilles monoculaires de l'œil droit ont été traversées par le stimulus présenté à l'autre œil. Cette présentation a été comparée à une condition contrôle de présentation du stimulus cible dans le même œil que les grilles.

Chong et Blake (2006) ont examiné la dominance initiale dans une tâche qui consistait à diriger l'attention volontaire pendant une présentation brève (250-500 ms) de stimuli dichoptiques. Le stimulus était constitué de barres orientées à 45° sur un œil et à -45° sur l'autre (Figure 27B). L'expérience a été divisée en deux phases. La première avec une vision dioptique (le réseau constitué des deux stimuli de B est présenté à l'œil droit et à l'œil gauche) (Figure 27A). Ici (phase A), le participant devait se concentrer sur l'une des orientations du réseau (c'est-à-dire $+45^\circ$ ou -45°), appelée stimulus cible. L'orientation spatiale et les fréquences de ce stimulus ont ensuite été modifiées pendant cinq secondes sur les deux yeux avant une période de récupération d'une seconde, au cours de laquelle le participant devait indiquer l'orientation du stimulus cible. Dans la deuxième phase (B), appelée dichoptique, deux stimuli rivaux (par exemple, tourné de $+45^\circ$ à droite ou de -45° à gauche), avec une fréquence spatiale identique à celle de la fin de la première phase, ont été présentés pendant 250 ou 500 ms. Le sujet devait indiquer l'orientation du stimulus cible, ou s'il avait perçu une image mixte (Figure 27).

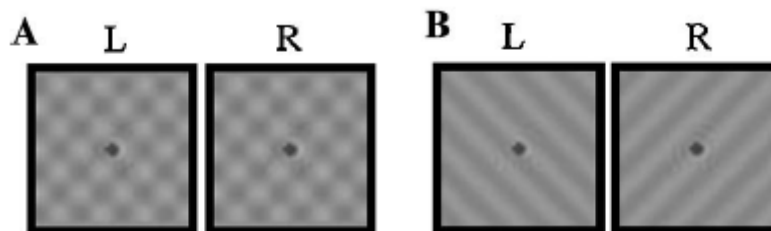


Figure 27 : Stimuli utilisés dans l'étude de Chong et Blake (2006)

Pendant la première phase appelée phase dioptique, la paire de stimuli (A) est présentée brièvement (250-500 ms). Le participant devait se concentrer sur une des orientations constituant le réseau ($+45^\circ$ ou -45°). Pendant la deuxième phase, appelée dichoptique, est présentée une paire de stimuli (B) constituée de barres orientées à $+45^\circ$ sur un œil et -45° sur l'autre (ou inversement) également brièvement (250-500 ms).

Les résultats ont montré que, pendant la phase dichoptique, lorsque les participants ont bien suivi le déplacement du stimulus cible pendant la phase dioptique, ils parvenaient à indiquer la bonne orientation du stimulus cible après les cinq secondes de changement d'orientation et de fréquences spatiales. Lorsque les participants ne suivaient pas le stimulus cible pendant la phase dioptique, ils percevaient le plus souvent un mixte des deux stimuli. Les auteurs ont expliqué cette constatation en termes de perte de vue du stimulus cible plutôt que de réorientation de l'attention vers la seconde orientation. Ils ont également montré que seul l'état d'attention pendant la dernière phase dioptique influençait la dominance initiale.

Résumé : La littérature suggère donc que l'attention endogène peut modifier la dominance initiale (Chong et Blake, 2006), le taux d'alternance (Helmholtz et Southall, 1924 ; Meng et Tong, 2004) et la prédominance (Ooi et He, 1999) dans des conditions de stimulations particulières et donc pas systématiquement.

II.2.3.2. Attention exogène ou attention involontaire

L'attention exogène est caractérisée par la présence de signaux externes qui activent automatiquement les processus d'attention.

Ooi et He (1999) ont observé que l'attention involontaire portée à un stimulus supprimé arrête la suppression et le rend dominant. Paffen et Van der Stigchel (2010) ont, quant à eux, observé que la suppression d'une image augmente le contraste perçu entre les images, ce qui augmenterait la probabilité d'alternance à cet instant. L'attention involontaire peut, selon eux, initier une alternance perceptive.

Mitchell et al. (2004) ont noté que la rivalité binoculaire et l'attention sont des processus de sélection de l'information. Leur étude consistait à présenter deux ensembles de points (a et b à l'œil droit, et a' et b' à l'œil gauche), l'un tournant dans le sens des aiguilles d'une montre (a et a' par exemple) et l'autre dans le sens inverse (b et b' par exemple) pendant 750 ms (Figure 28). Ensuite, pendant une période de 150 ms, 60 % des points de chaque œil (par exemple b et b') se sont déplacés dans l'une des huit directions, tandis que les 40 % restants se sont déplacés aléatoirement dans les sept autres directions. Les autres ont continué à tourner (a et a'). Les participants devaient indiquer la direction de la translation des points tout au long de l'essai. Après cette translation, les quatre ensembles de points tournaient à nouveau pendant 150 ms. Enfin, afin de susciter la rivalité, un seul des deux ensembles a été maintenu devant chaque œil (a' et b, ou a et b') pendant des durées allant de 150 à 1850 ms (afin d'étudier la dominance et la prédominance initiale) avant qu'ils ne disparaissent à leur tour.

Il a été demandé aux participants d'indiquer le sens de rotation du stimulus à la fin de l'essai lorsque cela était possible (dans le sens des aiguilles d'une montre, dans le sens inverse ou sens non perçu). Les résultats ont montré que l'ensemble de points en translation, qui était donc le centre d'attention, était celui qui était dominant à la fin de l'essai. Les auteurs ont conclu que l'attention et la rivalité sont basées sur des mécanismes de sélection induits par l'objet et impliquent un « mécanisme concurrentiel commun ». Cependant, Chong et Blake (2006) notent, en se basant sur Ooi et He (1999) et Mitchell et al. (2004), que l'attention exogène n'a aucun effet sur les stimuli dichoptiques présentés pendant plus de 400 ms.

Outre les stimuli visuels, des études ont été menées montrant que des interactions multi sensorielles pouvaient impacter la dynamique de la rivalité binoculaire. Ainsi, la présence d'un son (Ee et al., 2009 ; Kang et Blake, 2005), d'un retour tactile (Lunghi et Alais,

2013) et même d'une odeur particulière (Zhou et al., 2010) congruent à un stimulus rival augmentera la prédominance de ce dernier. La présence de source multisensorielle augmente donc l'attention portée au stimulus congruent.

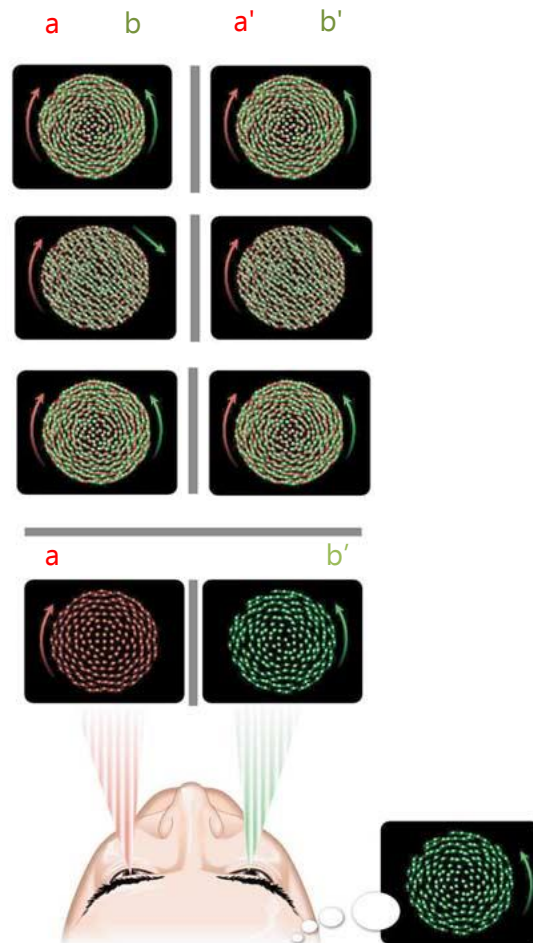


Figure 28 : Procédure utilisée dans Mitchell et al. (2004) pour analyser l'impact de l'attention exogène sur la rivalité binoculaire

Dans la phase dioptrique composée des trois premières lignes, les mêmes images sont présentées aux deux yeux. La dernière ligne sous le trait gris, est la phase dichoptique qui implique une rivalité binoculaire. La couleur des points n'a pas fait partie de l'expérience ; elle est montrée ici pour clarifier la méthode.

Résumé : L'attention exogène activée via des stimuli visuels semble avoir un effet sur la rivalité binoculaire lorsque ces stimuli sont présentés moins de 400 ms. De plus, l'attention exogène via une source multisensorielle semble modifier la dynamique de la rivalité binoculaire.

II.2.3.3. Cécité attentionnelle

Brascamp et Blake (2012) ont constaté que les alternances s'arrêtent lorsque l'attention est détournée des stimuli. Dans leur étude, l'attention volontaire qui est accordée aux stimuli dichoptiques produit une activité dans les zones rétino-topiques V1, V2 et V3 ; celle-ci se limite à V1 lorsque l'attention est détournée vers une tâche de reconnaissance de lettres qui n'induit pas de rivalité binoculaire. Ces conclusions s'inspirent de Zhang et al. (2011) qui ont également montré, en utilisant des EEG et des marqueurs physiologiques de la rivalité binoculaire, que lorsque l'attention est détournée des stimuli dichoptiques, le phénomène prend fin.

Une étude contradictoire aux deux précédentes a été menée par Roeber et al. (2011). A l'aide d'un EEG, les potentiels évoqués étaient mesurés tout d'abord pendant la présentation de stimuli rivaux perçus par le participant et sur lequel se portait l'attention. Il devait fixer un point central présent sur les deux yeux tout en indiquant quel stimulus dominait la perception. Ensuite, les potentiels évoqués étaient mesurés lorsque ces points au centre des stimuli rivaux étaient remplacés par une lettre également présente sur les deux yeux. Dans cette condition, c'est sur le centre de l'image que l'attention était portée puisque les participants devaient indiquer qu'elle lettre était visible (N ou Z). L'attention était ainsi détournée des stimuli rivaux. Les résultats de cette étude montrent une activité plus faible lorsque l'attention est portée sur les stimuli rivaux que lorsqu'elle est portée sur l'élément de fixation. Lors de la présentation des stimuli rivaux, ils n'avaient pas pour consigne de maintenir la perception sur un stimulus ou l'autre. La faible activité des potentiels évoqués retrouvée lorsque l'attention est portée sur les stimuli rivaux est donc bien contradictoire à celle de Zhang (2011) et à d'autres études (Khoe et al., 2008 ; Mishra et Hillyard, 2009) qui mesurent l'impact de l'attention pendant la présentation de stimuli rivaux à l'aide d'EEG. En effet, dans ces études, l'activité neuronale lors de la présentation de stimuli rivaux est bien plus élevée quel que soit le processus attentionnel engagé (attention volontaire ou involontaire). Roeber et al. (2011) expliquent leurs résultats du fait des différences méthodologiques employées puisque la durée de présentation est plus longue dans leur étude que dans les autres (au moins huit secondes contre 400-800 ms). La faible activité des potentiels évoqués implique qu'une adaptation a eu le temps de se mettre en place et que l'attention est moins efficace.

Résumé : La rivalité binoculaire cesse lorsque l'attention est détournée des stimuli dichoptiques et portée sur des stimuli fusionnables.

II.3. Modèles multi-niveaux traduisant le phénomène

Nous avons vu qu'il y a un rôle indéniable d'un traitement cortical précoce lors de la présentation de stimuli rivaux (Blake, 1989 ; Blake, Westendorf, et Overton, 1980 ; Polonsky et

al., 2000 ; Tong et Engel, 2001). Ce fut l'objet des travaux de Levelt (1965) et des recherches menées depuis les années 1960. Les différents scientifiques se concentraient essentiellement sur l'impact des caractéristiques des stimuli de bas niveaux et de l'inhibition monoculaire qui en résultait en sein du CGL ou de V1. Des études plus récentes font état d'un processus plus complexe de haut niveau avec un fonctionnement descendant évoluant selon le contexte et l'attention (Kovács et al., 1996 ; Logothetis, Leopold, et Sheinberg, 1996 ; Silver et Logothetis, 2007).

Pour décrire le processus lié à la rivalité binoculaire, de nombreux auteurs se sont intéressés à la création de modèles. Il en existe plusieurs qui reflètent le débat quant aux mécanismes sous-jacents à la rivalité binoculaire. Ces derniers peuvent être simples à l'image du modèle de Blake et O'Shea (2017) traduisant l'inhibition réciproque des neurones monoculaires des CGL ou de la couche quatre de V1 (voir paragraphe I.2) et l'adaptation neuronale qui en résulte (Figure 29) ou plus complexes à multi-niveaux comme celui de Tong et al. (2006) (Figure 30).

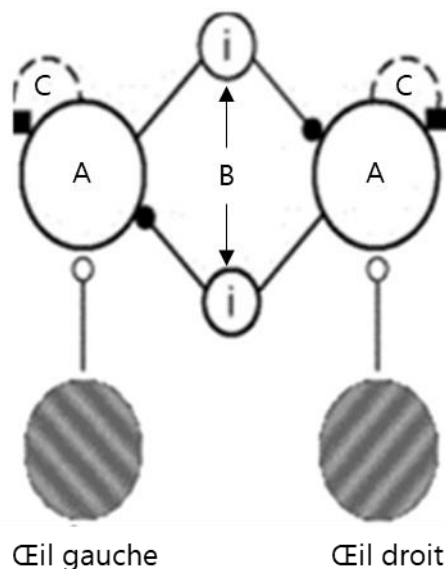


Figure 29 : Modèle générique de la rivalité binoculaire (Blake et O'Shea, 2017)

Les réseaux de neurones réagissant à des stimuli dichoptiques reçoivent une excitation (A). Lorsque ces stimuli sont reproduits sur des zones correspondantes des deux yeux, les neurones exercent une inhibition réciproque sur l'un d'entre eux (B). En raison d'un déséquilibre dans l'état initial d'activation des deux réseaux de neurones, provoqué par l'inhibition, un groupe de neurones étouffe l'activité de l'autre en favorisant la domination d'un stimulus sur l'autre. Avec le temps, le déséquilibre de l'activation entre les deux groupes de neurones diminue par adaptation neuronale (C), ce qui aboutit à un changement dans les niveaux d'activité relatifs et, par conséquent, dans l'état perceptif des stimuli.

Le modèle hybride plus complet de Tong et al. (2006) considère qu'il y a des interactions inhibitrices à la fois au niveau des neurones monoculaires mais également entre les neurones binoculaires, présents au-delà de la couche quatre de V1 (voir paragraphe I.1), plus sensibles aux stimuli (Figure 30A). Les connexions excitatrices entre deux neurones de

régions distinctes de l'espace visuel permettent le regroupement interoculaire entre les neurones qui ont les mêmes préférences (Figure 30B). Les projections rétroactives des zones plus élevées peuvent moduler l'activité des neurones des zones inférieures et donc la force de l'inhibition neuronale expliquant les effets de l'attention, de l'interprétation et du contexte des stimuli (Figure 30C).

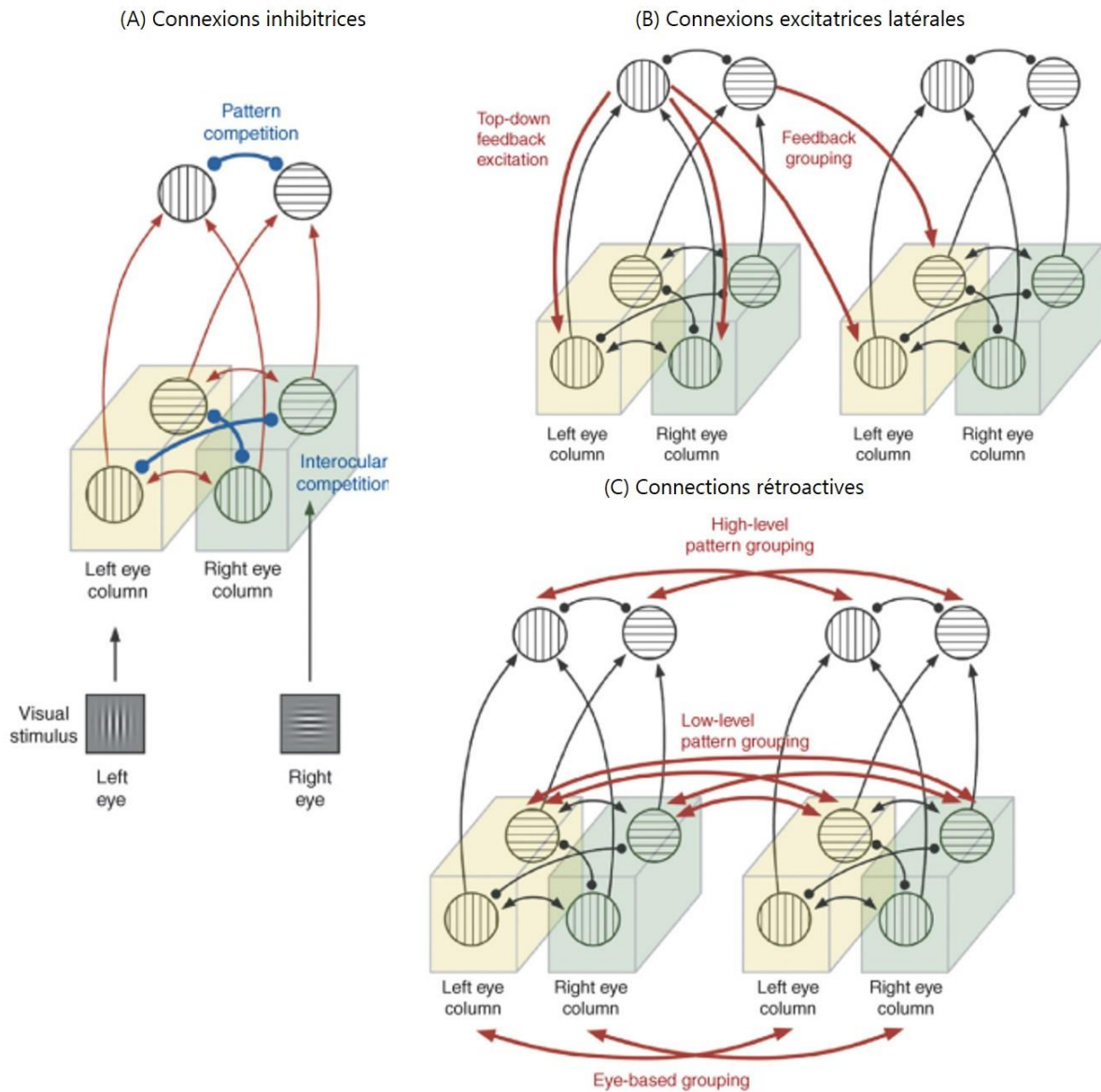


Figure 30 : Modèle multi-niveaux de Tong et al. (2006)

Sur ce schéma sont représentées les connexions inhibitrices et excitatrices au sein d'un modèle hybride de la rivalité binoculaire. Les lignes dont l'extrémité sont des cercles correspondent aux connexions inhibitrices. Celles avec des flèches comme extrémités sont les connexions excitatrices. L'image A représente les connexions inhibitrices réciproques en bleu entre les neurones monoculaires en bas et binoculaires en haut. Ces connexions pourraient expliquer respectivement une rivalité entre les deux yeux ou entre les deux stimuli. L'image B représente les connexions excitatrices réciproques en rouge. Ces interactions latérales pourraient expliquer la suppression visuelle basée sur le groupement de bas niveau entre les neurones monoculaires (rivalité entre les deux yeux), et le groupement de haut niveau basé sur la configuration entre les neurones binoculaires (rivalité entre les stimuli). L'image C

représente les projections excitatrices rétroactives. Elles tiennent compte des influences descendantes de l'attention et des effets rétroactifs du groupement perceptif.

Bien que l'attention endogène ou exogène puisse impacter à minima le taux d'alternance ou la perception d'une image, il est toutefois impossible de maintenir une perception exclusive de cette image de façon volontaire systématiquement et indéfiniment (Chong et Blake, 2006 ; Lumer, 1998 ; Meng et Tong, 2004 ; Mitchell, Stoner, et Reynolds, 2004 ; Ooi et He, 1999 ; Tong et al., 2002). Cela suggère d'autant plus que les processus neuronaux de haut niveau ne sont pas la cause de la rivalité mais qu'ils influencent les alternances perceptuelles.

Au regard des études qui ont été menées ces dernières années, le consensus actuel est que les deux formes de compétitions, oculaire et de stimuli (notamment liée à leurs caractéristiques physiques, leurs contextes et leurs interprétations), peuvent opérer (Silver et Logothetis, 2007) par le biais de connections neuronales descendantes. Le niveau cortical où se produit la suppression dépendra des caractéristiques des stimuli. Pour deux stimuli simples tels que des lignes d'orientations différentes, seul une inhibition réciproque des neurones monoculaires aura lieu (Wade et De Weert, 1986) alors que pour des stimuli plus complexes dont la propriété même suscite de l'interprétation, la suppression sera engagée également à un niveau cortical plus élevé (Howard et Rogers, 2012).

Selon Blake et O'Shea (2017), il faut néanmoins distinguer le processus impliqué dans le maintien de la dominance d'un des deux stimuli rivaux, du processus impliqué dans la suppression d'un des deux stimuli. Selon eux, les phases de dominance suivraient le même fonctionnement qu'une vision monoculaire et seraient donc influencées par le contexte, l'expérience antérieure et l'interprétation émotionnelle. La question concernant les phases de suppression et leur fonctionnement n'a selon eux pas encore été éclaircie. On peut cependant supposer que c'est un processus multi-niveau qui dépend aussi des stimulations.

Résumé : Le phénomène de rivalité binoculaire conduit à un processus de traitement de l'information complexe multi-niveaux. De la complexité des stimuli dépendra le niveau de traitement cortical engagé dans la résolution du conflit. De plus, il se pourrait que ce qui conduit à garder un stimulus dominant ne soit pas pour autant responsable de ce qui conduit à la suppression d'un des deux stimuli.

III. Vision binoculaire et visuels de casque monoculaires

La configuration des visuels de casque génère une perception particulière. L'image monoculaire est superposée à une image binoculaire. Dans ce chapitre, il sera évoqué dans un premier temps comment les visuels de casque modifient notre perception et comment les stimulation influence cette perception (Chapitre III.1). Dans un deuxième chapitre, étant donné la présentation de l'image monoculaire sur un seul œil, il sera évoqué l'impact de la dominance oculaire en lien avec les visuels de casque(Chapitre III.2). Etant donné que l'attention influence plus ou moins la perception avec des images dichoptiques, la question se pose quant à son influence en réalité augmentée monoculaire (Chapitre III.3). Enfin, comme c'est un outil qui modifie la perception visuelle, il sera évoqué dans une dernière partie de ce chapitre, quelques études ayant évalué le confort visuel avec des stimulations proches de celles des visuels de casque monoculaire (Chapitre III.4).

III.1. Impact des caractéristiques des stimulations monoculaires et binoculaires

Les études sur la rivalité binoculaire dans le contexte des visuels de casque monoculaires sont moins nombreuses que celles qui utilisent des images entièrement dichoptiques. La configuration avec un HMD monoculaire est quelque peu différente de ces dernières. L'image virtuelle est diffusée sur un œil et superposée au fond binoculaire qui, par définition, est commun aux deux yeux. Par conséquent, bien que les images présentées aux deux yeux ne soient pas parfaitement compatibles, la différence est limitée à une petite zone, en raison du champ de vision étroit des HMD. L'image virtuelle présentée devant un œil va non seulement être perçue en vision monoculaire de l'œil concerné mais va également se superposer au domaine de la vision binoculaire (Figure 5). Le dispositif TopMax®, par exemple, délivre un champ de vision de 26° par 20°.

Le fond et l'image collimatée à l'infini sont sur le même plan d'accommodation et vont être perçus par une zone rétinienne correspondante des deux yeux ne garantissant pas la fusion sensorielle. Or, il s'avère que la fusion sensorielle et la rivalité binoculaire ne sont pas les deux côtés d'une même pièce. Le contraire signifierait que la stéréopsie et la rivalité binoculaire ne peuvent coexister, ce qui a été réfuté notamment par plusieurs auteurs (Su, He, et Ooi, 2009).

Il existe cependant des stimulations où la rivalité perturbe la stéréopsie. Dans l'étude de Blake et al. (1991), deux images composées de stéréogrammes de points aléatoires fusionnables et garantissant la stéréopsie étaient présentées à chacun des deux yeux (8,5 cycles/deg) (Figure 31A). Un stimulus de plus hautes fréquences spatiales

(15,6 cycles/deg) était ajouté à l'un des deux yeux (Figure 31A, image de droite) et conduisait à la diminution du contraste sur cet œil. Le participant devait indiquer, pendant 60 s, la perception de ce stimulus comme étant totalement dominant, totalement ou partiellement supprimé. La qualité de la perception de la profondeur était évaluée à la fin de l'essai. Il s'avère que plus le niveau de fréquences spatiales du stimulus augmente, plus le stimulus alterne avec les deux images et la perception de la profondeur se dégrade. Ainsi, en présence de rivalité, la stéréopsie domine lorsque le niveau de contraste d'image de l'œil gauche est fort (*i.e.* lorsque la différence de contraste entre les images droite et gauche est faible) mais c'est la rivalité qui domine lorsque le contraste est faible (Blake, Yang, et Wilson, 1991).

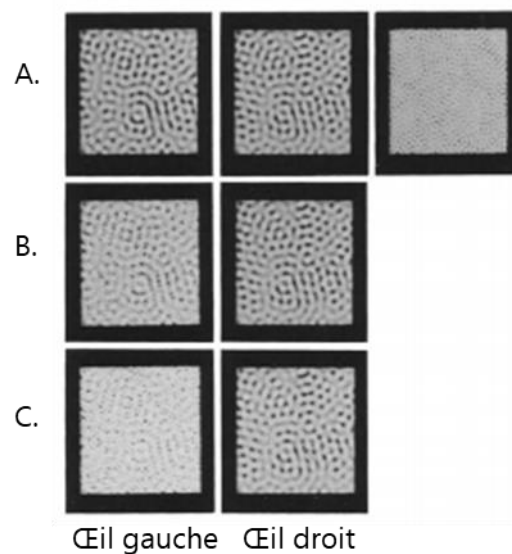


Figure 31 : Stimuli présentés dans l'étude de Blake et al. (1991)

Blake et Boothroyd (1985) ont également utilisé des stimuli qui génèrent une stimulation comparable à celle générée par l'utilisation des visuels de casque monoculaires. En effet, il était présenté aux deux yeux des barres verticales et l'image d'un œil était en plus composée de barres horizontales (Figure 32). Chaque stimulus mesurait 1,2° de diamètre. Le contraste d'un des trois motifs a été diminué (des barres verticales de l'œil droit ou de celles de l'œil gauche ou des barres horizontales de l'œil gauche). Le temps de réaction quant à la perception de la diminution du contraste a été mesuré selon quatre conditions : une condition contrôle de fusion de deux stimuli composés uniquement des barres verticales et trois conditions de variations de contraste d'un des trois motifs. Cette diminution de contraste permettrait d'initier la rivalité binoculaire entre les motifs. Or, tous les résultats étaient identiques à la condition de fusion, impliquant que cette présentation d'images ne susciterait pas autant de rivalité que deux images dichoptiques, quelle que soit la condition de diminution du contraste. La concordance de caractéristiques communes aux deux yeux renforce la fusion des motifs et stabilise la perception binoculaire (Blake et Boothroyd, 1985).

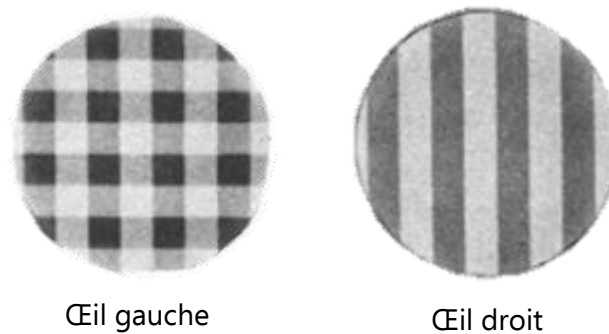


Figure 32 : Stimuli présentés dans l'étude de Blake et Boothroyd (1985)

Des barres horizontales et verticales sont présentées à l'œil gauche et uniquement des barres verticales sur l'œil droit.

Selon les résultats des deux études précédentes, la rivalité serait le résultat par défaut lorsque la correspondance binoculaire échoue. Elle se traduit par l'alternance des deux stimuli qui ne peuvent être fusionnés.

L'enjeu des études sur les visuels de casque monoculaires est donc de savoir dans quelle mesure, l'image monoculaire va rivaliser avec le fond, affecter la fusion binoculaire et donc potentiellement impacter les performances.

Comme pour les images dichoptiques, la rivalité binoculaire se manifeste différemment, selon les caractéristiques des simulations avec un visuel de casque. Le problème rencontré dans les études qui utilisent un fond binoculaire et une image monoculaire est qu'il est difficile d'étudier la dynamique de la rivalité binoculaire de la même manière qu'avec les images complètement dichoptiques (signalement des perceptions exclusives ou mixtes d'un motif), car certains éléments sont communs aux deux yeux. Par conséquent, la rivalité binoculaire est étudiée en évaluant les performances et la fatigue visuelle lors de tâches perceptives. Ainsi, certaines études ont montré que la rivalité binoculaire se manifeste plus ou moins selon les stimuli visuels (Patterson et al., 2007). Hershberger et Guerin (1975) ont évalué la prédominance de l'élément monoculaire lors de l'utilisation d'un visuel de casque. Dans cette première étude, les participants devaient fixer un objet statique dans une scène tout aussi statique et évaluer la prédominance de l'élément monoculaire ou de la scène. L'évaluation de la prédominance se faisait par le biais d'un levier de réponse dont la position pouvait aller de 0 à 100. Un score de 0 correspondait à une dominance exclusive de la scène et 100 une dominance exclusive de l'élément monoculaire. Plusieurs configurations d'affichage de 60 s chacune étaient évaluées. Entre chaque condition, l'équipement était ajusté pour correspondre à la prochaine condition d'affichage. Ce changement durait entre six à huit minutes. Pour chaque configuration, le participant indiquait subjectivement sa perception. Les résultats montrent que sept paramètres influencent la rivalité binoculaire lors de l'utilisation d'un visuel de casque. En effet, l'image monoculaire prédomine davantage sur le fond binoculaire lorsque :

- l'image monoculaire a un contraste plus élevé que le fond binoculaire (21,9 contre 4,6 ; mesurés tels que $C = B_{\max}/B_{\min}$) ;
- l'image monoculaire a une luminance plus élevée que le fond binoculaire ($8 \text{ fL} = 27,4 \text{ cd/m}^2$ contre $0,28 \text{ fL} = 0,96 \text{ cd/m}^2$) ;
- la résolution de l'image monoculaire augmente (630 lignes TV (TVL) par rapport à 165) ;
- le champ de vision de l'image monoculaire diminue (15° par rapport à un angle de vision de 45°) ;
- la complexité de la scène augmente ;
- la distance d'accommodation de l'image monoculaire est à l'infini par rapport à 30 pouces (0,76 m).

Dans ce même article (Hershberger et Guerin, 1975), une deuxième étude évalue l'influence des caractéristiques du fond binoculaire et d'une image monoculaire sur la performance en termes de détection et suivi de cible. L'image monoculaire pouvait avoir deux configurations : avec une résolution de 650 TVL à luminance de 10 fL ($34,25 \text{ cd/m}^2$) dite condition « bon HMD » ou avec une résolution de 240 TVL à luminance 0,3 fL ($1,03 \text{ cd/m}^2$) dite condition « faible HMD ». Il était placé uniquement sur l'œil gauche pour tous les participants et était collimaté à l'infini. Le fond binoculaire pouvait avoir deux luminances (10 fL ou 0,3 fL). Les mesures ont également été réalisées en condition binoculaire à résolution 640 TVL et luminance de 10 fL. La tâche de suivi de cible consistait à maintenir un indicateur sur la position 0 (galvanomètre) affiché dans le fond binoculaire. La tâche de détection de cible consistait à appuyer sur un bouton dès qu'une cible apparaissait et à la pointer pour vérifier que la bonne cible avait été détectée. Concernant les résultats sur la tâche de détection, il n'y a pas de différence significative entre les deux conditions de luminance du fond mais la performance est meilleure avec la condition « bon HMD » (temps de détection de 3 s en moyenne) par rapport à la condition « faible HMD » (temps de détection en moyenne de 6 s). Ce résultat montre qu'augmenter la force du stimulus qu'est l'image monoculaire par rapport au fond permet de le rendre dominant et donc a favorisé la détection de cibles apparaissant sur un œil en condition « bon HMD ». Néanmoins, ce résultat n'est pas retrouvé pour la tâche de suivi de cible puisqu'aucune différence significative n'a été trouvée quelles que soient les configurations du fond ou de l'image monoculaire. De plus, la performance à la détection de cible est nettement plus dégradée en condition de rivalité binoculaire (en moyenne 6s) par rapport à la condition binoculaire (en moyenne 2 s) contrairement à la performance de suivi de cible qui ne semble pas affectée par la rivalité binoculaire.

Laramee et Ware (2002) ont étudié les différences de performance entre neuf configurations impliquant la perception de la scène par un œil ou les deux (monoculaire ou binoculaire), statique ou dynamique et via un HMD opaque ou transparent (Figure 33). Deux conditions contrôles ont également été testées où les participants regardaient l'écran sans HMD (avec les deux yeux ou avec un seul œil). Bien qu'elles soient présentes sur la Figure 33,

les conditions binoculaires avec HMD opaque n'ont pas été testées. Elles sont remplacées par une condition HMD opaque monoculaire puisque seule l'information monoculaire est affichée.

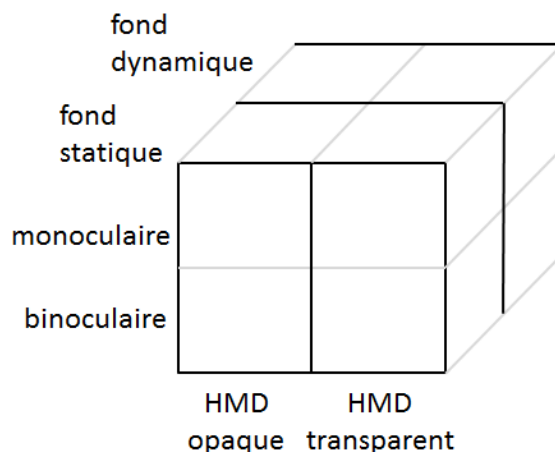


Figure 33 : Matrice 2³ des configurations évaluées dans l'étude de Larame et Ware (2002)

La scène peut être statique ou dynamique, perçue par un œil ou les deux (monoculaire ou binoculaire), et à travers un HMD opaque ou transparent. Une condition présente une perception avec un HMD opaque monoculaire sans perception de la scène. Il est à noter que cette figure ne représente pas les deux conditions contrôles sans HMD (avec les deux yeux et avec un seul œil).

Il a été mesuré le temps de réaction lors d'une tâche de reconnaissance de mot. Il n'a pas été mis en évidence de différence significative entre les conditions avec et sans HMD, ni entre les conditions monoculaires et binoculaires mais les auteurs recommandent l'utilisation de HMD dans un contexte statique car le temps de réaction augmente en situation d'environnement dynamique. Il y a également une augmentation de 21 % du temps de réaction avec un écran opaque monoculaire par rapport à la condition binoculaire et HMD transparent. Ce résultat montre que les performances décroissent lorsque sont présentés deux stimuli dichoptiques par rapport à une condition binoculaire ou monoculaire superposée à un fond binoculaire.

Dans l'étude de Winterbottom et al. (2006), il a été mesuré, un seuil de détection d'évènements lors de l'utilisation d'un visuel de casque monoculaire dans différentes conditions d'affichage. Cette étude se place dans une situation écologique puisqu'elle simule une perception en vol avec un visuel de casque. L'image monoculaire se compose de la symbologie de vol utilisée habituellement dans le JHMCS évoqué en introduction au chapitre II. Dans une condition, il était projeté une scène statique binoculaire (paysage désertique) (Figure 35) sur un écran et la symbologie de vol était projetée sur une lame semi-transparente devant un œil. Une condition contrôle consistait à projeter la scène statique, la symbologie et les évènements en binoculaire. Enfin, une troisième condition consistait à projeter la scène dans un seul œil et la symbologie dans l'autre œil. Cette dernière constituait une condition dichoptique. Les évènements à faible contraste (0,05) apparaissaient de part et

d'autre de la croix de fixation centrale de la symbologie entre 33 et 384 ms et étaient affichés soit sur la symbologie soit sur la scène. Les résultats montrent qu'il y a une interaction entre l'affichage des événements et la condition d'affichage (Figure 34).

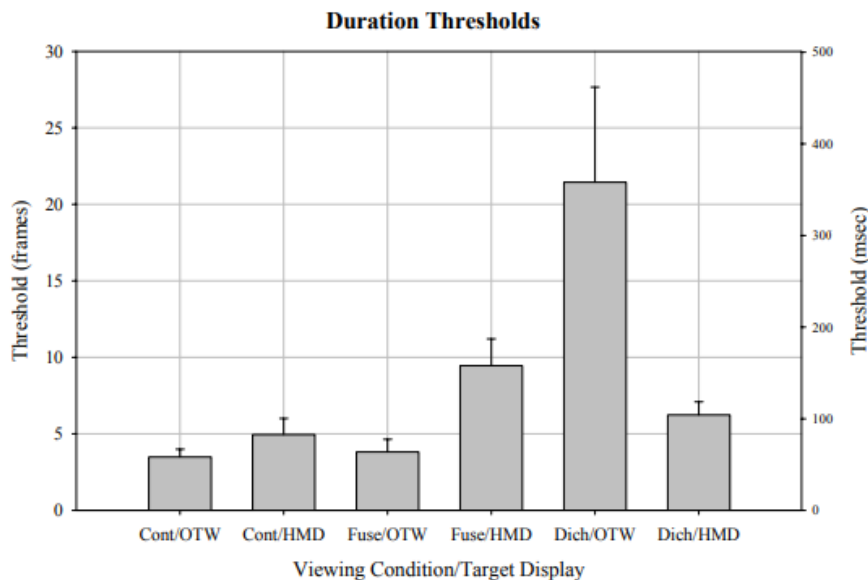


Figure 34 : Résultats de l'étude de Winterbottom et al. (2006)

Les seuils de détection sont affichés en fonction des conditions d'affichage de la scène et de la symbologie et également en fonction de l'affichage des événements. « Cont » représente la condition contrôle où la scène et la symbologie sont projetées en binoculaire ; « Fuse » correspond à la condition avec la scène projetée en binoculaire et la symbologie en monoculaire ; « Dich » correspond à la condition où la scène est projetée dans un œil et la symbologie dans l'autre. « OTW » représente l'affichage en binoculaire des événements et « HMD » en monoculaire.

Ainsi, le seuil de détection est plus élevé lorsqu'un événement est affiché sur la scène en condition dichoptique (Dich/OTW). Il est plus faible lorsqu'un événement est affiché avec la symbologie pour la condition monoculaire fusionnée (Fuse/HMD) et encore plus faible pour la condition contrôle quel que soit l'affichage des événements contrôle (Cont/OTW ou Cont/HMD). Cette étude montre que pour des événements peu contrastés et brefs, leur présentation monoculaire réduit les performances par rapport à leur présentation binoculaire. Ils expliquent que cette diminution est probablement due aux effets de la rivalité binoculaire et à l'alternance entre le fond binoculaire et l'image monoculaire. Selon eux, les périodes de suppression de l'image monoculaire devant être plus importantes que celles du fond. Or, cette conclusion se base sur le ressenti des participants (au nombre de six) qui rapportent une diminution de la visibilité des cibles lorsqu'elles sont projetées en monoculaire sur la scène binoculaire ou en condition dichoptique. Les périodes de suppression n'ont pas été mesurées.

Basée sur cette précédente étude, Winterbottom et al. (2015) ont évalué avec un dispositif de symbologie monoculaire superposée à l'environnement, l'impact sur les performances de la dynamique de la scène puis du contraste d'événements à détecter. La

dynamique de la scène pouvait avoir trois vitesses : 0 ; 36 et 324 km/h. Le paysage ressemblait au désert utilisé dans l'étude précédente (Figure 35). Trois conditions d'affichage de l'étude précédente ont été évaluées : la condition dichoptique (un œil voit la symbologie, l'autre voit uniquement la scène), la condition contrôle (les deux yeux voient la symbologie et la scène) et la condition monoculaire (les deux yeux voient la scène et la symbologie est projetée sur un seul œil). Comme pour l'étude précédente, la tâche consistait à détecter un évènement. Ce dernier avait un contraste de 0,2 et pouvait s'afficher selon deux positions par rapport à la croix de fixation et soit avec la symbologie soit dans la scène.

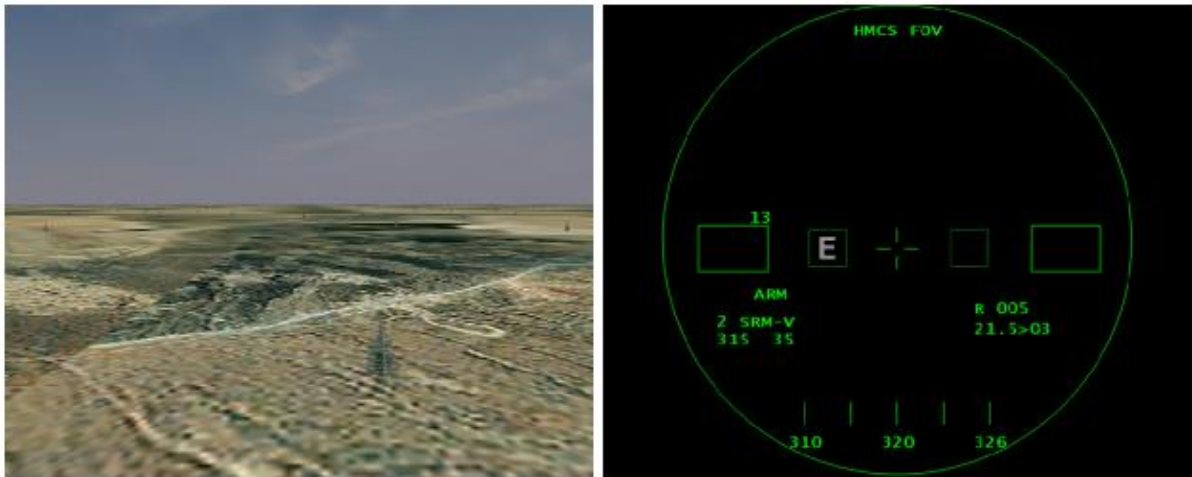


Figure 35 : Scène (gauche) et symbologie (droite) utilisées dans les études de Winterbottom et al. (2006 ; 2015)

Pour la condition associée au visuel de casque monoculaire, les résultats montrent que les seuils de détection sont meilleurs en condition d'affichage statique lorsqu'il s'agit de détecter des évènements dans le monoculaire qu'en condition d'affichage dynamique. Il n'y a pas d'autre effet de la dynamique de la scène pour cette étude.

L'impact du contraste a également été évalué. Les conditions sont les mêmes exceptées que la variable vitesse de la scène est remplacée par la variable contraste. Il s'agissait de présenter des cibles pouvant avoir trois contrastes : 0,2 ; 0,4 et 1,4. La scène projetée se déplaçait à 36 km/h, comme dans la condition de vitesse intermédiaire de l'étude précédente. Les résultats de cette étude montrent que les évènements à faible contraste augmentent le seuil de détection lorsqu'ils apparaissent dans l'image monoculaire plutôt que dans le fond binoculaire. L'augmentation du contraste de la cible, qu'elle soit affichée en binoculaire ou en monoculaire, favorise sa détection. La force de ce stimulus est augmentée par rapport au fond ou par rapport à l'image monoculaire dont le contraste ne varie pas.

Résumé : Bien que la perception entre deux images dichoptiques est différente de celle fournie par les visuels de casque monoculaire, on retrouve une influence des caractéristiques des stimuli dans les deux cas. Les études qui évaluent la rivalité binoculaire avec un visuel de casque monoculaire mesurent l'impact de l'affichage (conditions environnementales et image monoculaire) sur la prédominance de l'image monoculaire sur le fond binoculaire ou sur la performance de détection d'évènements monoculaires ou binoculaires. Il est supposé que la non-détection d'évènements ou la détection plus lente serait due à la suppression de l'image où il s'affiche et donc à la rivalité binoculaire.

Les études présentées rendent comptes notamment de l'impact de la dynamique, du contraste et des fréquences spatiales du fond binoculaire mais également du contraste et du champ de vision de l'image monoculaire sur les différentes performances évaluées.

III.2. Impact de la dominance oculaire

Les processus neuronaux de bas niveaux impliquant une compétition entre les deux yeux sont une des origines du phénomène de rivalité binoculaire. L'utilisation des systèmes de réalité augmentée semi-transparentes monoculaires interroge donc sur l'œil de présentation de l'image virtuelle. Une importante littérature étant en faveur d'une compétition entre les deux yeux, il semble pertinent de chercher à identifier si un œil domine massivement la perception par rapport à l'autre et de ce fait augmente la prédominance du fond binoculaire ou de l'image monoculaire. Les études qui traitent de cette question dans le cadre des visuels de casque monoculaires ont des résultats qui n'aboutissent pas à un consensus puisque d'un côté, il y aurait une réduction de l'apparition de la rivalité binoculaire en plaçant le dispositif sur l'œil dominant (Hershberger et Guerin, 1975) et de l'autre, il n'y aurait aucun changement de performance de l'utilisateur (Cupero et al., 2009).

La dominance oculaire est un sujet de débat de longue date. Au départ, on pensait qu'elle reflétait la latéralité générale du corps. C'est l'hypothèse avancée dans la première étude, réalisée en 1593 par Porta citée par Coren et Kaplan (1973) et revue par Borelli et al. (2017). Cependant, il a été démontré depuis que la dominance de visée n'est pas corrélée avec d'autres latéralités physiques telles que la main et/ou le pied dominant (Bourassa, 1996). En effet, la latéralité corporelle est liée à la dominance de l'hémisphère cérébral contra-latéral (l'hémisphère gauche est dominant chez les droitiers par exemple (Coren et Kaplan, 1973) tandis que, comme décrit précédemment (voir paragraphe I.1), les fibres du nerf optique des deux yeux subissent une semi-décussation au niveau du chiasma optique. Les fibres de chaque nerf optique sont donc présentes dans les deux hémisphères cérébraux (Coren et Kaplan, 1973 ; Porac et Coren, 1976 ; Porac, Whitford, et Coren, 1976 ; Suttle et al., 2009). La dominance oculaire ne peut donc pas, contrairement à la dominance du corps, refléter la dominance d'un hémisphère cérébral.

La communauté scientifique ne s'entend guère sur une définition de la dominance oculaire et les nombreuses définitions vont de pair avec la multitude de façons de la déterminer, ce qui, ensemble, contribue à un manque de clarté sur sa détermination et son utilisation. Seuls Gronwall et Sampson (1971) ont trouvé une corrélation positive entre différents tests de dominance, suggérant qu'il s'agit d'un phénomène unifactoriel. Néanmoins, les études majeures sur la dominance oculaire font globalement état de plusieurs types de dominance (Berner et Berner, 1953 ; Chaumillon et al., 2015 ; Cohen, 1952 ; Coren et Kaplan, 1973 ; Gronwall et Sampson, 1971 ; Lederer, 1961 ; Suttle et al., 2009) et la plupart en dénombre trois :

- la dominance oculaire d'acuité qui définit l'œil dominant comme celui qui possède les meilleures capacités de discrimination des détails (Chaumillon, 2015 ; Coren et Kaplan, 1973 ; Ehrenstein, Arnold-Schulz-Gahmen, et Jaschinski, 2005 ; Gronwall et Sampson, 1971 ; Porac, Whitford, et Coren, 1976 ; Suttle et al., 2009).
- la dominance oculaire motrice, appelée aussi œil de visée, qui se réfère à l'œil choisi inconsciemment lors de la réalisation d'une tâche monoculaire telle que la tâche d'alignement d'un objet proche avec un objet lointain (Chaumillon, 2015 ; Coren et Kaplan, 1973 ; Ehrenstein, Arnold-Schulz-Gahmen, et Jaschinski, 2005 ; Gronwall et Sampson, 1971 ; Li et al., 2010 ; Pointer, 2012 ; Seijas et al., 2007).
- la dominance oculaire sensorielle qui définit l'œil dominant comme celui ayant la plus grande prédominance dans une situation de rivalité binoculaire (Berner et Berner, 1953 ; Coren et Kaplan, 1973 ; Handa et al., 2004 ; Li et al., 2010 ; Pointer, 2012 ; Porac et Coren, 1976 ; Suttle et al., 2009).

Les dispositifs de réalité augmentée monoculaires peuvent provoquer de la rivalité binoculaire (Rash et al., 2009). C'est tout naturellement vers ce dernier type de dominance oculaire qu'on suppose qu'il faudrait se tourner pour choisir l'œil de présentation de l'image monoculaire. Toutefois, les études de Hershberger et Guerin (1975) et de Cupero et al. (2009) ont analysé la performance de pilotes d'avion munis de visuels de casque monoculaires en fonction de leur dominance oculaire motrice et non selon la dominance oculaire sensorielle. Aucune étude, à ce jour, ne permet de dire si la dominance oculaire sensorielle a un impact sur la performance et le confort visuel des utilisateurs de visuels de casque monoculaires.

Alors que les premiers dispositifs imposaient une visualisation de l'image devant l'œil droit, impliquant une adaptation de l'utilisateur, certains systèmes proposent aujourd'hui un imageur modulable permettant une présentation de l'image monoculaire sur l'œil droit ou l'œil gauche (c'est le cas notamment du TopMax®). Pour déterminer cet œil, soit un test moteur classique de dominance oculaire est réalisé sans appui scientifique soit il est simplement laissé le choix à l'utilisateur.

Résumé : Il n'y a pas de consensus quant à l'importance de prendre en compte la dominance oculaire dans l'utilisation des visuels de casque monoculaires. Néanmoins, seule la dominance oculaire motrice a été testée à ce jour.

III.3. Impact de l'attention

L'étude de Winterbottom et al. (2006), utilisant un visuel de casque monoculaire et les mêmes stimuli visuels que dans ses études précédentes, à savoir un fond binoculaire sur lequel est superposée une symbologie de vol (Winterbottom, R. Patterson, et al., 2006 ; Winterbottom et al., 2015), évalue également l'impact de l'attention endogène sur les performances de détection d'évènements. Il est demandé aux participants d'essayer de maintenir l'attention sur le fond, sur la symbologie, ou de ne pas focaliser leur attention sur l'un ou l'autre. Les évènements à détecter sont présentés soit sur l'image monoculaire soit sur le fond. Les résultats indiquent que les performances de détection des évènements sont dégradées lorsque l'attention est portée sur la symbologie mais pas lorsqu'elle est portée sur le fond binoculaire. Les auteurs supposent que le fait que le fond soit binoculaire, et permette donc une fusion des deux yeux, atténuerait les effets de la rivalité binoculaire lorsque l'attention est portée sur lui.

A l'inverse de l'attention endogène, l'attention exogène n'a pas été évaluée à ce jour lors de l'utilisation d'un visuel de casque monoculaire. Des études de détection de cible ont été faites impliquant un stimulus externe sollicitant potentiellement l'attention exogène mais n'étant pas sujet à modifier une autre variable de performance, on ne peut rendre compte de son impact sur la rivalité binoculaire.

Résumé : La performance de détection d'évènements monoculaires ou binoculaires est améliorée lorsque l'attention endogène est portée sur le fond binoculaire mais pas lorsqu'elle est portée sur l'image monoculaire. L'effet de l'attention exogène en visuel de casque n'a pas été évalué à ce jour.

III.4. Évaluation du confort visuel en lien avec les visuels de casque

Alors que différentes études évoquées précédemment se contentent de mesurer des performances selon différentes conditions d'affichage (Hershberger et Guerin, 1975 ; Laramée et Ware, 2002 ; Winterbottom, R. Patterson, et al., 2006), d'autres y intègre une mesure de la fatigue visuelle et de troubles oculaires que peuvent provoquer les visuels de casque monoculaires par rapport à une configuration binoculaire avec ou sans HMD.

Browne et Moffit (2009) ont par exemple évalué via une échelle adaptée de Babbitt et Nystrom (1989), qu'une stimulation monoculaire superposée au fond binoculaire générerait plus d'inconfort visuel qu'une stimulation projetée sur un écran. Après chaque stimulation, les participants devaient dire si cette dernière était « pas inconfortable à voir », « assez inconfortable à voir » ou « très inconfortable à voir ».

Cupero et al. (2009) ont, quant à eux, évalué le confort selon une configuration soit bioculaire soit monoculaire sur l'œil dominant moteur ou sur le non dominant. A la fin de chaque approche réalisée par les participants, ils devaient évaluer leur confort sur une échelle de score de 0 à 7 développée par Casali et Grenell (1990). Par exemple, pour évaluer une douleur, 0 signifie aucune douleur et 7 très douloureux. Les résultats ne rapportent pas d'effet de la dominance oculaire sur le confort mais une vision floue moins importante est observé en condition monoculaire par rapport à la condition bioculaire.

D'autres études plus générales sur la fatigue des pilotes munis de visuel de casque ont été réalisées et relevaient des plaintes en termes de fatigue visuelle et de troubles oculaires liées au visuel de casque monoculaire (Behar et al., 1990 ; Hale et Piccione, 1989 ; Rash et al., 2009).

Résumé : L'utilisation des visuels de casque monoculaires pouvant générer de la fatigue visuelle, la mesure du confort visuel des utilisateurs a été évaluée dans différentes études à l'aide de questionnaires.

IV. Synthèse de l'état de l'art

A travers cet état de l'art, ont été présentés les processus de fusion et de rivalité binoculaires qui permettent de borner la stimulation visuelle particulière que génère l'utilisation des visuels de casque.

Les deux informations qui sont captées par chacun de nos yeux vont, dès leur entrée dans le système visuel, être en conflit. Si bien que le cerveau va tenter tout au long du traitement de ces images de le résoudre. En fonction de certains paramètres, la résolution du conflit conduira à des perceptions différentes.

Si les deux images sont fusionnables via la fusion sensorielle et que la disparité binoculaire ne dépasse pas l'horoptère plus que ce que la vergence fusionnelle peut compenser, en résultera une perception simple des images. Ce cas de figure serait l'aboutissement du processus de fusion de deux images. Or, il peut s'avérer qu'il soit mis à mal. En résulte une perception différente et/ou de la fatigue visuelle et/ou des baisses de performances.

Si, par exemple, les images sont fusionnables mais d'une disparité trop importante, en résultera une perception double.

Lorsque deux images permettent la fusion motrice mais qu'une trop grande partie de l'image tombe sur des points correspondants des deux rétines, la fusion sensorielle n'est plus possible ce qui génère une alternance entre une partie ou la totalité des deux images. On parle de rivalité binoculaire. Selon les caractéristiques de ces images et leur interprétation, la dynamique de la rivalité sera impactée (prédominance, taux d'alternance).

La présentation de deux images, dont l'ensemble est fusionnable mais dont une partie génère un conflit, se trouve entre la fusion et la rivalité. C'est le cas notamment lorsqu'est projetée une image monoculaire sur un fond binoculaire. La zone où est projetée l'image monoculaire est en conflit avec la zone correspondante de l'autre œil. Dans ce contexte, la fusion du fond est maintenu mais il s'agit de savoir comment les performances peuvent être impactées avec ce type de stimulation.

Étant donné le besoin d'utiliser ces systèmes dans un contexte aéronautique où le risque de suppression d'un élément pendant une phase d'approche doit être évité ou maîtrisé, il faut pouvoir comprendre dans quelle condition visuelle cette suppression se produit le plus. On entend donc par condition visuelle, à la fois les caractéristiques du fond binoculaire (*i.e.* de l'environnement) et les caractéristiques de l'image monoculaire (*i.e.* symbologie) ainsi que son positionnement sur un œil ou sur l'autre.

V. Problématiques et hypothèses

L'utilisation des systèmes de réalité augmentée monoculaires permet de s'affranchir des contraintes liées aux affichages tête haute tout d'abord par le fait qu'ils sont moins encombrants, peuvent s'adapter à un cockpit existant et permettent son usage quelle que soit la direction de la tête. Ensuite, par rapport à une présentation bio/binoculaire, l'affichage monoculaire permet un meilleur ajustement de l'imageur ce qui constitue un gain de temps de mise en place et réduit le risque d'un mauvais positionnement. Dans l'aviation civile alors que l'enjeu est d'augmenter la vision du pilote tout en garantissant une perception non dégradée à moindre coût, il faut s'assurer que les performances soient garanties et que les systèmes de réalité augmentée monoculaires ne génèrent pas d'inconfort visuel. Bien que l'application première de ces dispositifs se fasse dans le domaine de l'aviation, la problématique reste vraie quel que soit le domaine d'utilisation de ces systèmes.

Ainsi, au regard des études menées avec les visuels de casque monoculaires notamment dans l'armée américaine depuis les années 1990, il semble important de comprendre comment la fusion binoculaire est parfois mise à mal par ces systèmes provoquant des baisses de performances et de l'inconfort visuel.

1. On sait que les caractéristiques physiques des stimuli influencent la résolution du conflit entre fusion et rivalité. Le premier enjeu est de déterminer si ces caractéristiques sont les mêmes en présentant des images complètement dichoptiques, celles le plus utilisées dans la littérature sur la rivalité binoculaire, et lors de la présentation d'une image virtuelle monoculaire superposée en temps réel à l'environnement binoculaire. On suppose que les caractéristiques du fond binoculaire, mais également de l'image monoculaire, vont influencer les performances.

Seront évalués, à travers un dispositif expérimental reproduisant les contraintes de la réalité augmentée monoculaire, les performances et le confort visuel des participants avec un fond binoculaire et une image monoculaire bien caractérisés en termes de fréquences spatiales, de contraste et de luminance afin de rendre compte de l'effet des caractéristiques visuelles sur la perception en réalité augmentée monoculaire.

2. La rivalité binoculaire pourrait être résolue par des processus de bas niveau résolvant donc le conflit entre les deux yeux. La question se pose alors quant à l'effet de la dominance oculaire. Si un effet de l'œil de présentation est trouvé lors de l'utilisation des systèmes de réalité augmentée monoculaires, pouvons-nous prédire quel œil sera le plus performant via la dominance oculaire ?

L'enjeu est donc tout d'abord de déterminer si les performances diffèrent selon l'œil de présentation. Si c'est le cas, il nous faut déterminer si la dominance oculaire, quelle qu'elle soit (motrice, d'acuité ou sensorielle), permet de déterminer cet œil. Pour se faire, il sera

évalué dans un premier temps, les performances en fonction de l'œil de présentation puis la dominance oculaire sera évaluée selon différents tests des trois types issus de la littérature (motrice, d'acuité et sensorielle). Il s'agira ensuite d'évaluer si un des tests de dominance oculaire détermine l'œil avec lequel les performances sont meilleures.

3. L'état de l'art montre également que l'attention exogène peut influencer la rivalité binoculaire avec des images dichoptiques mais n'a pas été testée dans les conditions de notre problématique de réalité augmentée monoculaire. L'hypothèse faite est que l'attention exogène portée sur l'image monoculaire permet de limiter la suppression due à la rivalité binoculaire.

Pour appréhender cette question, il sera évalué les performances et le confort visuel avec une image monoculaire soumise à changement de contraste au cours du temps.

4. Les études psychophysiques permettront de répondre aux hypothèses avec des stimulations bien caractérisées en termes de fréquences spatiales et de contrastes. Etant donné que ce travail a un but applicatif, puisque directement lié aux visuels de casque monoculaires destinés à l'aviation, nous faisons l'hypothèse que la performance sera également influencée différemment selon les conditions visuelles associées à une configuration plus écologique de simulation de vol avec le dispositif TopMax®.

Les performances et le confort visuel seront donc évalués grâce à la mise en place d'un dispositif expérimental reproduisant au maximum les conditions visuelles en vol. L'impact sur les performances des conditions environnementales, de l'affichage monoculaire, de l'œil de présentation et de l'attention exogène, ont été évaluées à travers cette expérimentation.

Partie 2 : Études expérimentales

I. Évaluation des caractéristiques des stimuli visuels sur les performances (étude psychophysique).....	63
I.1. Introduction.....	64
I.2. Impact des caractéristiques des stimulations sur la rivalité binoculaire.....	67
I.2.1. Méthode.....	67
I.2.2. Résultats.....	79
I.2.3. Discussion.....	90
I.3. Impact de la dominance oculaire.....	94
I.3.1. Méthode.....	95
I.3.2. Résultats.....	102
I.3.3. Discussion.....	103
I.4. Conclusion de l'ensemble de l'étude.....	104
II. Evaluation de différents profils de pulsation	105
II.1. Introduction	106
II.2. Méthode	108
II.2.1. Participants	108
II.2.2. Matériel.....	109
II.2.3. Stimuli	109
II.2.4. Tâche.....	114
II.2.5. Procédure.....	114
II.2.6. Recueil des données	115
II.2.7. Analyse statistique	115
II.3. Résultats	115
II.3.1. Effet de l'entraînement.....	116
II.3.2. Effet de la modification du fond binoculaire et de la cible par rapport à l'étude I (conditions contrôles)	116
II.3.3. Effet des caractéristiques des stimulations pour les 24 conditions.....	117
II.4. Discussion	120
II.4.1. Impact des modifications méthodologiques.....	120
II.4.2. Effet d'un conflit interoculaire de type réalité augmentée monoculaire sur la perception et le confort.....	121
II.4.3. Influence des caractéristiques du fond binoculaire.....	121
II.4.4. Influence des caractéristiques d'affichage.....	122
III. Evaluation des paramètres d'affichage en simulateur avec un dispositif de réalité augmentée monoculaire semi-transparent (étude écologique)	125
III.1. Introduction	126

III.2. Méthode	127
III.2.1. Participants	127
III.2.2. Matériel.....	127
III.2.3. Stimuli	129
III.2.4. Tâche	134
III.2.5. Procédure.....	136
III.2.6. Recueil des données	136
III.2.7. Analyse statistique	136
III.3. Résultats	138
III.3.1. Effet de l'entraînement.....	138
III.3.2. Effet de l'œil de présentation	138
III.3.3. Effet des caractéristiques des stimulations	141
III.4. Discussion	147
III.4.1. Impact de l'œil de présentation.....	147
III.4.2. Effets de la réalité augmentée monoculaire sur la perception et les performances de pilotage	148
III.4.3. Influence des conditions environnementales.....	149
III.4.4. Influence des caractéristiques d'affichage.....	150

I. Évaluation des caractéristiques des stimuli visuels sur les performances (étude psychophysique)

I.1. Introduction	64
I.2. Impact des caractéristiques des stimulations sur la rivalité binoculaire	67
I.2.1. Méthode	67
I.2.1.1. Participants	67
I.2.1.2. Matériel	67
I.2.1.3. Stimuli	69
I.2.1.4. Tâches	74
I.2.1.5. Procédure	74
I.2.1.6. Recueil des données	76
I.2.1.7. Analyse statistique	78
I.2.2. Résultats	79
I.2.2.1. Effet de l'entraînement	80
I.2.2.2. Effet de l'œil de présentation	80
I.2.2.3. Effet de la stimulation sur la fusion motrice	82
I.2.2.4. Effet des caractéristiques des stimulations	82
I.2.3. Discussion	90
I.2.3.1. Impact de l'œil de présentation	90
I.2.3.2. Effets d'un conflit interoculaire de type réalité augmentée monoculaire sur la perception et les performances de pilotage	91
I.2.3.3. Influence des caractéristiques du fond binoculaire	91
I.2.3.4. Influence des caractéristiques d'affichage	93
I.3. Impact de la dominance oculaire	94
I.3.1. Méthode	95
I.3.1.1. Participants	95
I.3.1.2. Tests de dominance oculaire	95
I.3.1.3. Procédure expérimentale	101
I.3.1.4. Traitement de données	101
I.3.1.5. Analyses statistiques	101
I.3.2. Résultats	102
I.3.3. Discussion	103
I.4. Conclusion de l'ensemble de l'étude	104

I.1. Introduction

L'état de l'art révèle que la rivalité binoculaire est dépendante des stimuli présentés (Hershberger et Guerin, 1975 ; Hollins et Leung, 1978 ; Levelt, 1965 ; Liu, Tyler, et Schor, 1992 ; O'Shea, Sims, et Govan, 1997 ; Peli, 1990 ; Winterbottom et al., 2015 ; Wolfe, 1983). Deux images dichoptiques de luminance moyenne basse provoquent moins de rivalité que deux images dichoptiques avec une luminance moyenne plus haute (Wolfe, 1983). De plus, deux images dichoptiques de hautes fréquences spatiales provoquent moins de rivalité que deux images dichoptiques de basses fréquences spatiales (Wolfe, 1983). Dans ce cas, les deux images, mêmes si elles sont dichoptiques, présentent des caractéristiques communes. Lorsque les deux images dichoptiques diffèrent par leur caractéristique de luminance par exemple, l'image possédant la luminance la plus élevée aura tendance à dominer davantage la perception (Levelt, 1965 ; Peli, 1990).

Un stimulus ajouté sur un œil alors que deux images fusionnables sont présentées aux deux yeux aura aussi un impact sur la perception résultante. Plus la différence de contraste sera élevé entre le stimulus et les deux images, plus il y aura d'alternance de l'image monoculaire avec les images binoculaires (Blake, Yang, et Wilson, 1991).

La rivalité est dépendante des caractéristiques des images tout comme la fusion. Deux images dont la fréquence spatiale est élevée auront une limite de fusion plus faible que deux stimuli de basse fréquence spatiale. Dans l'étude de Roumes et al. (1997), il a été évalué en fonction des fréquences spatiales des stimuli, la disparité binoculaire maximale qui permet de maintenir la fusion des deux images. Cette disparité maximale diminue lorsque la fréquence spatiale des stimuli est augmentée. En revanche, la variation de contraste des deux images ne modifie pas leur limite de fusion (Schor, Heckmann, et Tyler, 1989).

Lorsqu'une image monoculaire est présentée sur un fond binoculaire, les caractéristiques de ces images vont impacter la prédominance d'une des deux images (Hershberger et Guerin, 1975 ; Winterbottom et al., 2015). Ainsi, la prédominance de l'image monoculaire sur le fond binoculaire a lieu lorsque son contraste, sa luminance ou sa résolution sont plus forts que ceux du fond (Hershberger et Guerin, 1975). Ces observations ont été vérifiées dans un contexte particulier, à savoir la présentation d'une image statique sur un fond binoculaire également statique.

Lors de l'utilisation des dispositifs de réalité augmentée monoculaires en vol, la tâche consiste à diriger le vecteur vitesse dynamique sur la piste d'atterrissage également dynamique. C'est pourquoi Winterbottom et al. (2015) ont évalué l'impact de la dynamique de la scène sur la rivalité. Ils ont montré qu'une scène statique favorisait la détection de cibles monoculaires.

En vol, les conditions environnementales peuvent être différentes selon s'il s'agit d'un vol de jour ou de nuit et selon la météo. Il semble donc important de déterminer comment la

rivalité binoculaire impacte les performances et le confort visuel lors de l'utilisation d'un système de réalité augmentée monoculaire selon différentes conditions environnementales.

La littérature qui utilise les images dichoptiques mesure la rivalité binoculaire en suivant les fluctuations de l'image perçue, au fil du temps. En général, le taux d'alternance, la durée moyenne et la prédominance d'un stimulus sont mesurés. En réalité augmentée monoculaire, si un stimulus apparaît pendant une phase de suppression, l'observateur ne pourra pas le détecter ou l'identifier ; cette perte d'information constitue une indication de suppression visuelle. Toutefois, la propension à la suppression en situation de réalité augmentée monoculaire est faible. Ainsi, ces mesures ne sont pas les plus pertinentes pour évaluer la rivalité binoculaire lors de l'utilisation de ces systèmes. C'est pour cela que les auteurs évaluant la rivalité binoculaire dans les visuels de casque monoculaires mesurent plutôt des temps de réponse à la détection et/ou l'identification de cibles. Or, la tâche de pilotage ne se résume pas à cela. En effet, il est nécessaire de détecter les alertes pouvant apparaître dans l'image monoculaire, mais il faut surtout diriger l'avion vers la cible, à savoir la piste d'atterrissage perçue en binoculaire. Ainsi dans ce contexte, la perte d'information pourrait être aussi bien due à la suppression mais aussi à une focalisation attentionnelle sur la tâche de pilotage entraînant une cécité attentionnelle (Simons et Chabris, 1999). La double tâche proposée par Hershberger et Guérin (1975) dans leur deuxième étude se proposait donc d'évaluer à la fois les performances à la reconnaissance d'une cible mais également à une tâche de suivi (maintenir un galvanomètre à position nulle). Ces derniers n'ayant pas trouvé d'impact de la rivalité binoculaire sur cette deuxième variable, c'est sans doute pour cela que les études suivantes n'évaluent pas ce paramètre. A ce jour, peu d'étude proposent une double tâche dans l'évaluation de la rivalité binoculaire lors de l'utilisation des visuels de casque monoculaires en situation dynamique.

Comme indiqué précédemment, Winterbottom et al. (2006) n'ont pas évalué l'effet de l'attention exogène sur la performance de détection et d'identification de cibles. Par conséquent, la question se pose quant à son impact sur la performance dans un contexte d'utilisation d'un visuel de casque monoculaire.

De plus, l'impact de la dominance oculaire lors de l'utilisation de ce type de système (évoqué dans l'état de l'art) ne relève pas d'un consensus. En effet, Hershberger et Guérin (1975) trouvent un effet quand Cupero et al. (2009) ainsi que Browne et al. (2010) n'en trouvent pas. Dans les deux cas, c'est la dominance oculaire motrice qui a été considérée. Il semble pourtant raisonnable de supposer que la rivalité binoculaire associée aux dispositifs de réalité augmentée monoculaires est, comme l'indiquent Berner et Berner (1953), davantage associée à la dominance oculaire sensorielle. Il s'agira donc d'évaluer si la dominance oculaire est importante à prendre en compte dans l'utilisation des systèmes de réalité augmentée monoculaires et si c'est le cas, quelle est sa nature, motrice, d'acuité ou sensorielle. Pour évaluer l'effet de la dominance oculaire, cette dernière a été déterminée pour chaque participant par une série de tests détaillés au chapitre I.3.1.2. Puis les résultats

de dominance oculaire ont été comparés avec l'œil déterminé comme meilleur pour chaque variable de performance mesurée.

Cette première expérimentation a pour but d'évaluer trois hypothèses. Les caractéristiques visuelles des images (le fond binoculaire et la symbologie monoculaire), l'attention exogène et la dominance oculaire impactent les performances dans un contexte présentant un conflit interoculaire.

Cette étude examine donc les performances mesurées dans une tâche de suivi de cible et une tâche de détection d'évènements (Cupero et al., 2009 ; Hershberger et Guerin, 1975 ; Winterbottom, R. Patterson, et al., 2006) selon différents niveaux de fréquences spatiales et de contraste du fond binoculaire mais également selon différents contrastes de la symbologie monoculaire. Outre les caractéristiques des stimuli, est examiné également l'impact de la dominance oculaire sur ces performances. Quant à l'attention exogène, elle est évaluée par l'ajout de modifications de luminance au cours du temps (appelée pulsation) de la symbologie monoculaire.

La rivalité binoculaire peut provoquer des symptômes tels que de la fatigue visuelle, des maux de tête et de la suppression visuelle (Rash et al., 1998). Nous avons donc utilisé également une mesure du confort visuel pour évaluer le phénomène (Cupero et al., 2009).

La suppression partielle ou totale d'une image peut être occasionnée par la rivalité binoculaire. La fusion motrice peut alors être altérée par cette suppression et par le fait que chaque œil voit deux images différentes difficilement fusionnables. Des tests optométriques ont été effectués afin de déterminer si la fusion motrice des participants est impactée par le conflit interoculaire.

Afin d'identifier l'impact de ce qui peut être assimilé à des conditions environnementales, nous avons fait varier le niveau des fréquences spatiales et du contraste du fond binoculaire.

Les impacts des caractéristiques des stimulations visuelles, de l'attention et de l'œil de présentation, dans le contexte de la réalité augmentée monoculaire, ne sont pas clairement identifiés dans la littérature. Nous avons donc décidé d'évaluer leur influence en modulant ces paramètres par rapport à un élément monoculaire mobile représentant la symbologie.

Les critères de performance ont été évalués à différentes fréquences spatiales et niveaux de contraste de la scène binoculaire et différentes caractéristiques de la symbologie monoculaire. Le confort subjectif a été évalué pour chacune de ces conditions.

L'évaluation de l'impact des caractéristiques des stimulations fera l'objet d'une première partie dans laquelle sera décrite la méthode employée, les résultats relatifs aux différentes caractéristiques des stimulations (caractéristiques du fond binoculaire, caractéristiques de l'affichage de la symbologie monoculaire et des évènements, œil de présentation de l'image monoculaire) et leur interprétation (0). Dans une deuxième partie,

l'impact de la dominance oculaire, évaluée selon différents tests de dominance oculaire (motrice, sensorielle et d'acuité) sera évalué (I.3).

I.2. Impact des caractéristiques des stimulations sur la rivalité binoculaire

I.2.1. Méthode

I.2.1.1. Participants

Dix-huit participants ont pris part à l'ensemble de l'étude comprenant les tests de dominance oculaire et l'évaluation des performances et du confort visuel : douze femmes et six hommes âgés de 21 à 45 ans (moyenne $32 \pm 7,3$ ans). Les critères d'inclusion étaient les suivants :

- amétropie non compensée limitée à $\pm 1,00 \delta$, mesurée avec l'autorefractomètre Nidek AR600A (Nidek, Aichi, Japon) ;
- acuités visuelles compensées de loin (6 m) et de près (0,4 m) supérieures à 9/10 (<0.03 unités logarithmiques) pour chaque œil ;
- anisométrie inférieure à $2,00 \delta$;
- acuité stéréoscopique inférieure ou égale à 120 secondes d'arc ;
- participant conscient du phénomène de diplopie physiologique ;
- absence de problèmes moteurs, neurologiques ou oculomoteurs.

L'étude a été menée conformément à la Déclaration d'Helsinki et a satisfait aux exigences légales locales (N IDRCB : 2018-A01331-54).

I.2.1.2. Matériel

Le participant était assis à 3,20 m d'un écran de 2,58 m de large et 1,60 m de haut sur lequel deux images étaient projetées à 120 Hz à l'aide d'un vidéoprojecteur stéréoscopique (F80-4k7, Barco, Courtrai, Belgique) d'une résolution de 2560 x 1600 px (Figure 36). La distance à l'écran disponible dans la salle d'expérimentation, la taille et la résolution de l'image ont permis d'obtenir une image projetée de fréquences spatiales maximales de 6,92 cycles/deg.

L'étude a été menée dans une salle d'expérimentation noire avec aucune autre stimulation visuelle que celle proposée par l'écran.

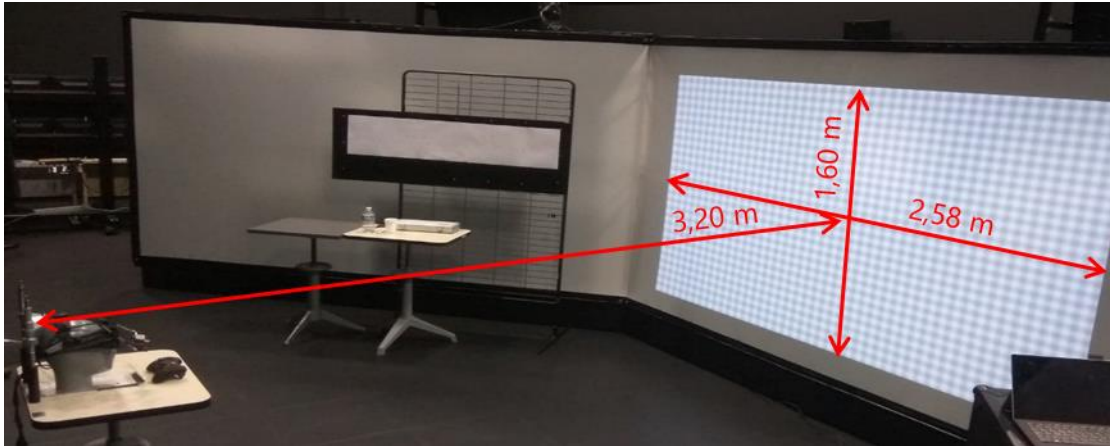


Figure 36 : Dispositif expérimental reproduisant un système de réalité augmentée monoculaire
Le participant était assis à 3,20 m d'un écran de 2,58 par 1,60 m.

Le participant portait des lunettes actives* à occlusion (Edge RF, Volfoni, Paris, France) à 60 Hz pour chaque œil (Figure 37). Elles permettaient d'obtenir un affichage dédié à chacun des deux yeux pouvant reproduire le phénomène de réalité augmentée monoculaire. Le participant portait également un oculomètre (EyeLink II, EyeLink®, Ottawa, Canada) qui mesurait la position du regard tout au long de l'exposition (Figure 37). La tête du participant était maintenue par une mentonnière pour s'assurer qu'elle reste dans la même position pendant chaque condition.



Figure 37 : Oculomètre et lunettes actives

Une manette de jeu (Cordless Rumblepad 2, Logitech®, Lausanne, Suisse) a été utilisée pour réaliser les tâches (Figure 38).

*Voir Annexe 1 : Glossaire



Figure 38 : Manette de jeu

La manette de jeux était utilisée avec les deux mains pour réaliser les tâches.

Pour l'étude de la fusion motrice, il a été utilisé une échelle modifiée de Thorington avec un cylindre de Maddox et un stylo lampe permettant la mesure des phories. Il a également été mesuré les réserves fusionnelles qui a nécessité l'utilisation d'une barre à prismes de Berens horizontale de 1 à 45 dioptries. L'évaluation de la vergence forcée a été effectuée à l'aide d'une carte de Wesson, de deux verres polarisés et de trois prismes de 3 Δ, 6 Δ et 10 Δ.

Pour évaluer le confort visuel des participants, un questionnaire a été utilisé (Annexe 2). Le participant devait donner un score de 0 à 5 (0 étant aucune gêne, 5 une gêne très intense) sur l'évaluation de sa fatigue visuelle et des symptômes ressentis (maux de tête, vision double, vision floue et tiraillements oculaires).

I.2.1.3. Stimuli

La génération des stimuli s'est faite via la Psychophysics Toolbox du logiciel Matlab (The MathWork, Natick, MA, USA). La luminance moyenne de l'écran était de 13 cd/m², la luminance maximale de 26 cd/m² et minimale de 0 cd/m². Afin d'identifier l'impact des caractéristiques de type fréquence spatiale et contraste, deux valeurs de fréquences spatiales, hautes et basses (*i.e.* 6,92 cycles/deg et 1 cycle/deg), un niveau de contraste pour les hautes (*i.e.* 100 % de la luminance maximale de l'écran pouvant atteindre 26 cd/m²) et trois niveaux de contraste pour les basses fréquences spatiales (*i.e.* 100 %, 60 % et 20 % de la luminance maximale de l'écran) ont été testés pour le fond binoculaire. La fréquence spatiale se définit comme un motif composé de bandes alternativement sombres et lumineuses qui se reproduit identiquement à des positions régulièrement espacées. Le nombre de paires de bandes sombres et claires (une paire = un cycle) par unité de distance angulaire permet de quantifier la fréquence spatiale en cycles par degré. Plus le niveau est élevé, plus il y a de cycles par degré et ainsi, plus l'image est détaillée.

Le contraste a été calculé selon l'équation :

$$C = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}$$

Ces stimuli étaient construits afin d'être caractérisés en termes de fréquence spatiale et de contraste et donc exempts de tout contenu sémantique. Le fond binoculaire était

composé d'une part de réseaux sinusoïdaux verticaux et horizontaux, et d'autre part, d'une cible circulaire (2,1°) qui suivait les mouvements du fond (Figure 39). Elle était donc perçue à travers les lunettes à la luminance moyenne du fond binoculaire (13 cd/m²) et se déplaçait avec à une vitesse de 2°/s dessinant une trajectoire identique quelle que soit la condition (Annexe 3).

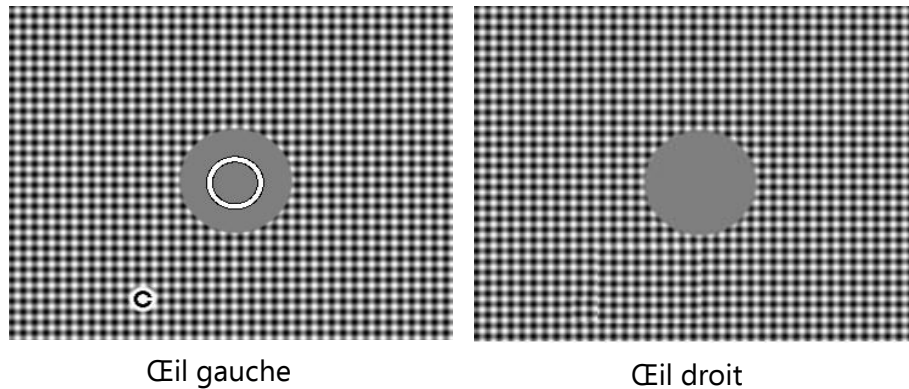


Figure 39 : Images présentées à chaque œil

Le fond binoculaire était composé de réseaux sinusoïdaux facilitant la fusion sur lequel une cible circulaire (disque gris) était représentée. La cible et le fond se déplaçaient conjointement.

Le fond binoculaire et donc les réseaux sinusoïdaux pouvaient avoir plusieurs niveaux de contraste mais conservaient la même luminance moyenne (Tableau 2).

Tableau 2 : Luminances maximales et minimales des réseaux sinusoïdaux en fonction des trois conditions de contraste du fond

	Contraste du fond		
	100 %	60 %	20 %
Luminance max	26 cd/m ²	20,49 cd/m ²	15,6 cd/m ²
Luminance min	0 cd/m ²	5,20 cd/m ²	10,4 cd/m ²

Comme la rivalité binoculaire, y compris dans le contexte de la réalité augmentée monoculaire, est connue pour dépendre des caractéristiques du stimulus, nous avons choisi de faire varier également le contraste de la symbologie monoculaire à aligner avec la cible circulaire associée au fond. Elle était représentée sous la forme d'un anneau de soutien un angle de 0,75°, à l'image du vecteur vitesse (*Flight path vector* ou FPV) utilisé classiquement dans la symbologie de vol (Figure 40). Le contraste de la symbologie monoculaire a été modifié en ajustant le niveau de luminance du centre de l'anneau et de son contour (bord interne et bord externe).

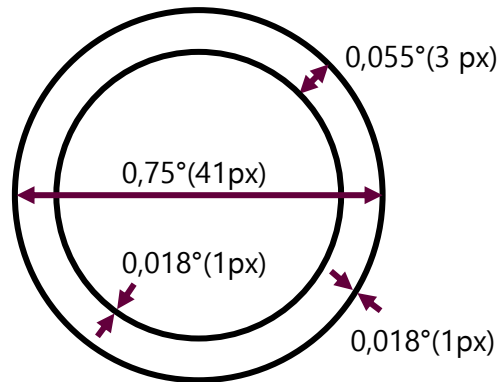


Figure 40 : Symbologie monoculaire sous forme d'anneau

L'anneau avait un diamètre de $0,75^\circ$. Il possédait des contours interne et externe et un centre non matérialisé. Leur luminance variait respectivement en fonction des luminances minimales et maximales de l'écran fixées par chaque condition.

La symbologie pouvait avoir deux niveaux de contraste : un niveau de contraste de 100 % et un niveau de contraste de 60 %. Afin de distinguer le contraste de la symbologie monoculaire de celui du fond binoculaire, ils seront évoqués différemment dans ce manuscrit. Ainsi, le fond binoculaire peut avoir 100 %, 60 % ou 20 % de contraste et la symbologie monoculaire peut avoir un contraste égal à 1 ou 0,6 (Figure 41).

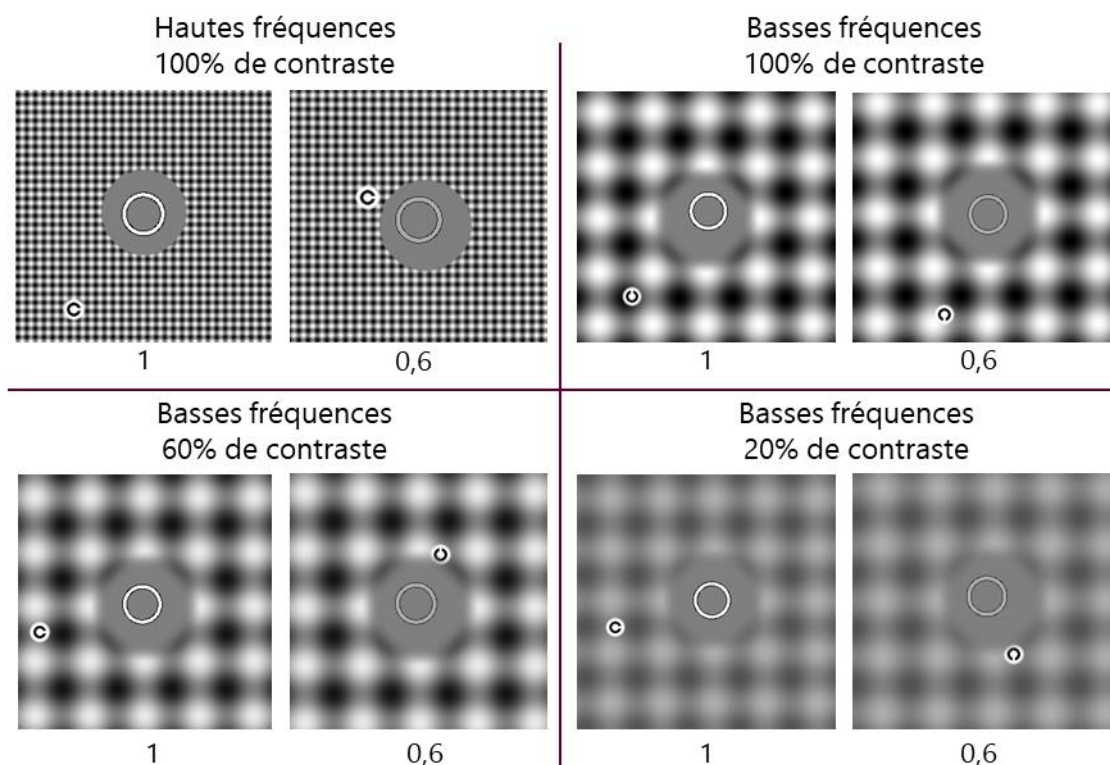


Figure 41 : Caractéristiques du fond binoculaire et de la symbologie monoculaire

L'anneau monoculaire, qui peut avoir deux niveaux de contraste (1 ou 0,6), est présenté sur un fond binoculaire qui peut avoir deux niveaux de fréquences spatiales (6,92 cycles/deg ou 1 cycle/deg) et trois niveaux de contraste différents (100 %, 60 % ou 20 %).

L'attention exogène a été évaluée en faisant varier le contraste et l'épaisseur de la symbologie monoculaire au cours du temps. Pour simuler ce changement de contraste, nous avons appliqué un masque sur la symbologie monoculaire qui la rendait de plus en plus « transparente » au fil du temps selon un profil bien défini. Cette variation était appelée pulsation et reposait sur un profil d'une durée de 2000 ms qui se répétait en continu (Figure 42). Chaque période se composait d'une diminution linéaire du contraste jusqu'à atteindre un contraste minimal (selon la condition de contraste) pendant 500 ms suivie de 50 ms à un contraste minimal puis une remontée linéaire rapide (en 30 ms) jusqu'au contraste maximal. À l'issue de ces variations, l'épaisseur totale de la symbologie monoculaire (centre de l'anneau, contours interne et externe) était doublée pendant 60 ms puis reprenait sa forme initiale pendant les 1360 ms restantes de la période (Figure 42).

Le profil de la pulsation variait selon les conditions de contraste 1 (Figure 42) et 0,6 (Figure 43) de la symbologie monoculaire.

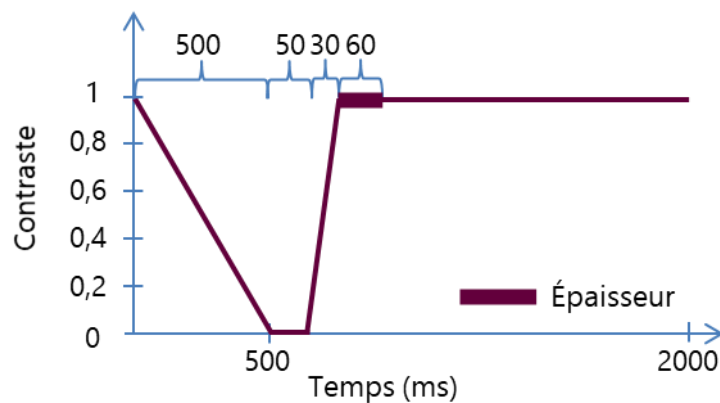


Figure 42 : Profil de la pulsation de la symbologie monoculaire avec un contraste maximal de 1

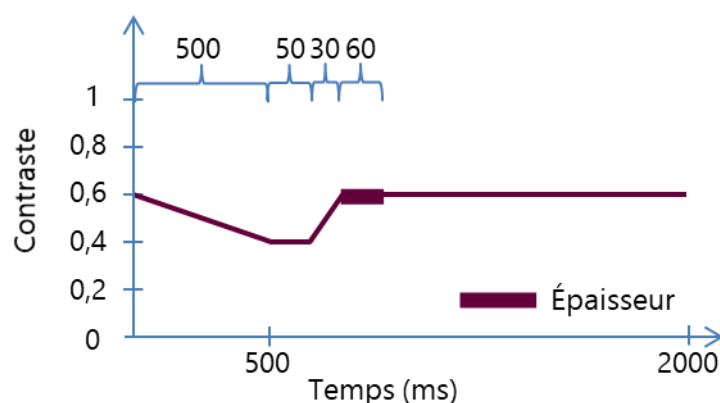


Figure 43 : Profil de la pulsation de la symbologie monoculaire avec un contraste maximal de 0,6

Les évènements à identifier étaient des anneaux de Landolt (Figure 44) affichés aléatoirement entre 500 et 1500 ms toutes les 5000 à 8000 ms en binoculaire ou en

monoculaire. Tous les anneaux étaient affichés avec la même taille ($0,48^\circ$) et avec un contraste de 100 % ; le but était de s'assurer que leur identification ne dépendait que de l'affichage (binoculaire vs monoculaire). Ils étaient présentés selon quatre sens d'ouverture (c'est-à-dire s'ouvrant vers la gauche, la droite, le haut ou le bas), selon deux excentricités ($0,81^\circ$ et $2,00^\circ$ d'angle visuel) aléatoirement autour du centre de la cible. Seize événements par essai devaient être identifiés.

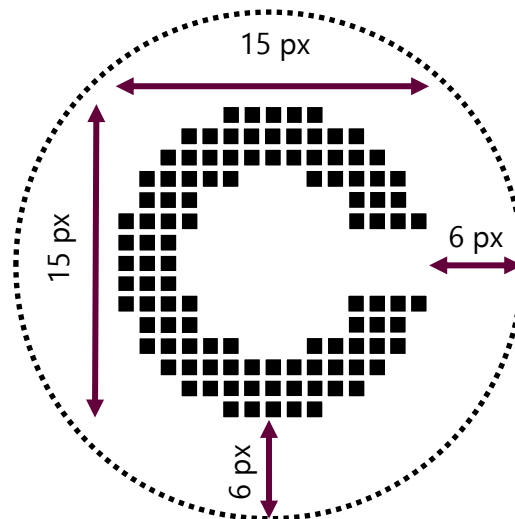


Figure 44 : Évènement présenté sous forme d'anneaux de Landolt

Chaque carré noir représente un pixel. Les anneaux étaient entourés d'un cercle plein blanc sans contour permettant de le distinguer du fond. Un filtre gaussien était appliqué pour éviter l'effet de bord du cercle blanc. La taille des anneaux de Landolt était de $0,48^\circ$.

Au total, les performances ont été évaluées selon 32 conditions :

- 4 conditions de fond dont une avec un fond en hautes fréquences spatiales à 100 % de contraste et 3 avec un fond en basses fréquences spatiales pouvant avoir 100, 60 ou 20 % de contraste ;
- x 2 yeux (symbologie monoculaire placée aléatoirement sur l'œil droit ou l'œil gauche) ;
- x 2 contrastes de la symbologie monoculaire (1 ou 0,6) ;
- x 2 pulsations (avec ou sans) (Figure 45).

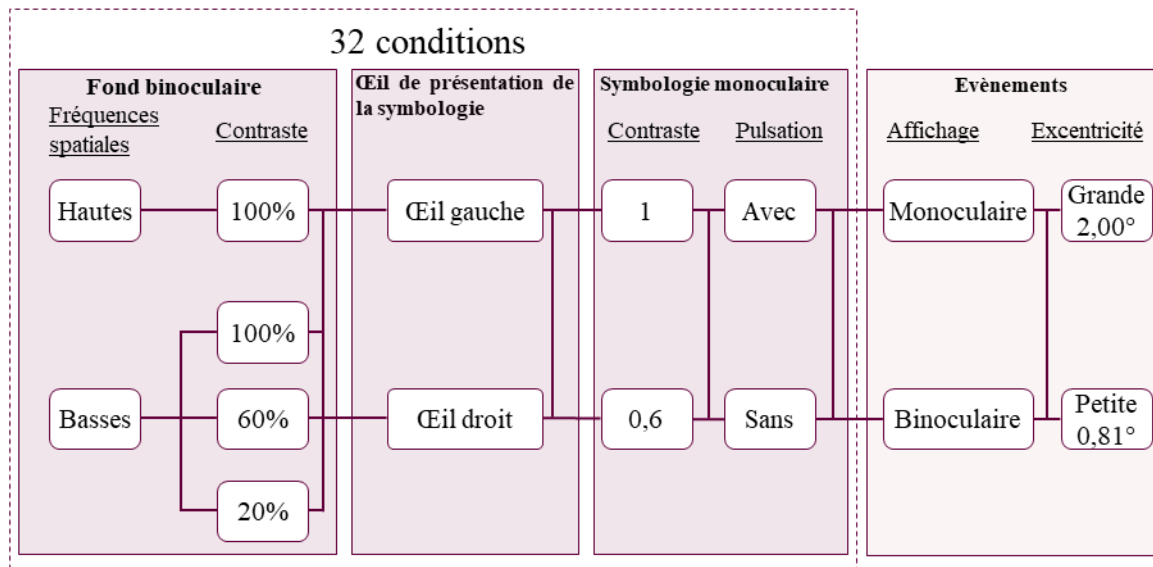


Figure 45 : Variables indépendantes évaluées : œil de présentation, paramètres du fond binoculaire et caractéristiques de la symbologie monoculaire

Dans chaque condition étaient présentés des évènements pouvant être affichés sur un œil ou sur les deux yeux et à deux excentricités différentes.

I.2.1.4. Tâches

La tâche de suivi de cible consistait à faire coïncider le centre de la symbologie monoculaire avec le centre de la cible mobile binoculaire à l'aide de la manette de jeu.

Parallèlement, le participant devait détecter le plus rapidement possible le sens d'ouverture de l'anneau de Landolt (*i.e.* l'évènement) en utilisant les flèches directionnelles de la manette. Il pouvait corriger une éventuelle erreur. Une erreur était enregistrée si sa dernière réponse et le sens d'ouverture de l'anneau ne correspondaient pas ou s'il n'avait pas appuyé avant l'apparition de l'évènement suivant.

Si le participant supprimait l'ensemble ou une partie du fond binoculaire ou de la symbologie monoculaire, il avait la possibilité de l'indiquer par l'appui sur l'une des quatre gâchettes de la manette.

I.2.1.5. Procédure

Une fois que les instructions avaient été données au participant, que son consentement avait été signé et que les critères d'inclusion avaient été vérifiés, les tests de dominance oculaire ont été réalisés (voir paragraphe I.3.1.2). Au moins un jour après la réalisation de ces tests, une première session, permettant de réaliser 16 des 32 conditions était réalisée.

La session démarrait par la réalisation de trois tests optométriques : phorie de vision de loin, réserves fusionnelles de vision de loin et disparité de fixation et vergence forcée en

vision de près. Les tests ont été dans l'ordre mentionné afin d'aller du test le plus dissociant au plus associant. Ceci permettait préserver au maximum les éventuels effets sur la fusion motrice.

Le premier test consistait à mesurer la phorie du participant (Annexe 4). Situé à 3 m de l'échelle modifiée de Thorington, il devait placer le cylindre de Maddox orienté horizontalement devant son œil droit. Le stylo lampe étant placé au centre de l'échelle, le participant percevait un point lumineux et l'échelle graduée avec un œil et une barre verticale rouge avec l'autre. En fixant le point lumineux, il devait alors indiquer où se situait la barre sur l'échelle graduée. La barre perçue à gauche du point lumineux correspondait à une exophorie, à droite une esophorie.

Le deuxième test permet de mesurer l'amplitude de fusion du participant (Annexe 4). Ce dernier était placé à 3 m de l'écran sur lequel était projeté un anneau de Landolt d'acuité 7/10. Alors qu'il fixe l'anneaux de Landolt, une barre à prisme est placée devant son œil droit en base interne tout d'abord. La puissance du prisme est augmentée jusqu'à ce que le participant ne soit plus en mesure de le compenser. Une fois l'anneau vu double, la puissance du prisme est diminuée jusqu'à ce qu'il fusionne à nouveau. Les valeurs de prisme auxquelles il a vu flou, double puis fusionné à nouveau ont été relevées. Les mesures sont réitérées en base externe.

Le troisième test consiste à mesurer la disparité de fixation et la vergence forcée via une carte de Wesson placée à 0,40 m (Annexe 4). Muni de verres polarisés, le participant devait indiquer la position de la flèche noire centrale par rapport à l'échelle visible sur la carte. Sans prisme la mesure constituait la disparité de fixation du participant. Cette mesure a été ensuite réalisée avec des prismes de 3Δ , 6Δ et 10Δ en base interne et externe placés sur l'œil droit.

Une fois les tests optométriques effectués, le participant était équipé de l'oculomètre et des lunettes actives. Il devait ensuite se placer assis devant l'écran et se positionner sur la mentonnière afin de maintenir sa tête stable pendant chaque essai (Figure 46).

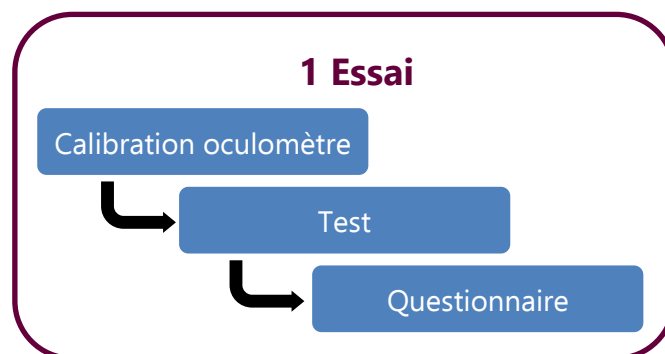


Figure 46 : Déroulement d'un essai

L'oculomètre demandait une calibration des caméras avant chaque condition. Un premier passage de familiarisation était effectué. Étant donné le grand nombre de conditions

et le fait que chaque condition demandait une calibration et un temps de chargement des images assez long, le passage de chaque participant était divisé en deux sessions (Figure 47). Une session durait 2h30min. La première session comprenait une séquence aléatoire de 16 essais précédés d'un passage de familiarisation. À la fin de cette première session, les tests optométriques étaient réalisés à nouveau dans le même ordre que précédemment. La deuxième session suivait la même procédure que la première à savoir la réalisation des tests optométriques, un passage de familiarisation, le passage des 16 autres conditions randomisées et pour finir de nouveau les trois tests optométriques (Figure 47).

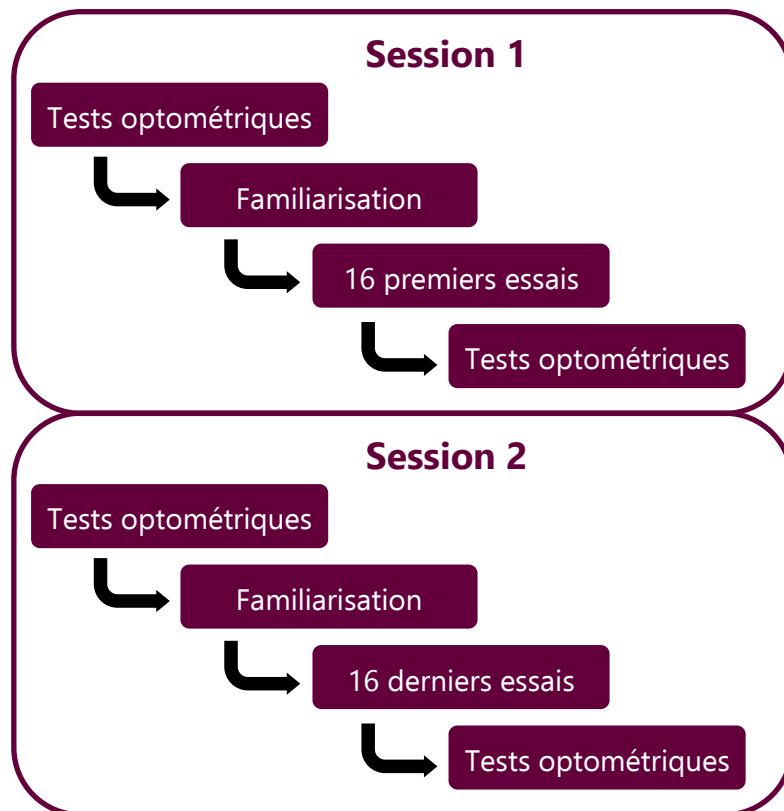


Figure 47 : Procédure des deux sessions

L'expérimentation s'est décomposée en deux sessions. Les deux sessions étaient composées de la réalisation des trois tests optométriques puis d'un test de familiarisation, suivi de 16 essais puis à nouveau des trois tests optométriques.

Chaque essai d'une durée d'environ six minutes, comprenait une calibration de l'oculomètre, une condition d'une durée d'environ deux minutes et était suivi d'un questionnaire sur le ressenti du participant vis-à-vis de la contrainte visuelle imposée par la condition effectuée (Annexe 2). Il pouvait également confirmer oralement ou non la perte visuelle d'une information (fond binoculaire ou symbologie monoculaire).

I.2.1.6. Recueil des données

La fusion motrice a été mesurée par les tests optométriques avant et après chaque session (I.2.1.5). Elle a été évaluée au travers d'une mesure de la phorie via la méthode

modifiée de Thorington à 3 m, une quantification des réserves fusionnelles à l'aide d'une barre à prisme également à 3 m et l'évaluation de la courbe de vergence forcée à 0,40 m en utilisant une carte de Wesson.

Le traitement des données pour chaque variable a été réalisé avec le logiciel Matlab.

La performance a été évaluée en fonction des variables suivantes :

- suivi de la cible ;
- qualité de l'identification des évènements ;
- temps de détection des évènements ;
- latence de la réponse oculomotrice lors de l'apparition des évènements ;
- temps de fixation des évènements.

Les données permettant d'obtenir chacune des variables sont décrites ci-dessous.

La performance de suivi a été évaluée en considérant l'erreur moyenne, en degrés, entre le centre de la symbologie monoculaire et le centre de la cible binoculaire, tous deux caractérisés par leurs coordonnées cartésiennes en pixel. Cette erreur est la moyenne des distances entre eux. Les coordonnées sont converties en minutes d'arc. Le participant étant placé à 3,2 m de l'écran mesurant 2,58 x 1,60 m avec une résolution de 2560 x 1600 px on obtient la conversion suivante :

$$1 \text{ px} = 1,008 \text{ mm}$$

$$1^\circ = \tan(1 * 3,20 \text{ m}) = 0,056 \text{ m}$$

$$1 \text{ px} = 0,018^\circ$$

$$1^\circ = 60'$$

L'erreur à la cible est donc mesurée à chaque rafraichissement de l'image selon l'équation suivante :

$$\text{Erreur à la cible} = \sqrt{(x_{\text{Symbologie}} - x_{\text{cible}})^2 + (y_{\text{Symbologie}} - y_{\text{cible}})^2}$$

Cette distance est moyennée sur chaque condition pour obtenir la performance de suivi de cible par condition.

La performance d'identification des évènements a été évaluée en calculant le score de bonnes réponses à l'identification de ces derniers pour chaque condition.

La performance de détection des évènements a été évaluée comme le temps, en millisecondes, entre l'apparition de l'évènement et la première réponse du participant sur la manette.

Le temps de latence de la réponse oculomotrice à l'apparition d'un évènement a été mesuré à l'aide de l'oculomètre. Il correspond au temps entre l'apparition de l'évènement et la saccade oculaire vers celui-ci, considérée comme débutant lorsque cinq points successifs

dépassent 2° /seconde (Maxwell, Tong, et Schor, 2010) (Figure 48). Le temps de fixation a également été enregistré, il s'étend du premier pic de vitesse jusqu'au pic de vitesse opposé au premier. Les données oculométriques d'un des dix-huit participants comportaient un bruit de mesure conséquent sur plusieurs conditions ce qui a conduit à exclure ses données. Dix-sept participants ont donc été pris en compte dans les analyses des temps de latence et de fixation des événements.

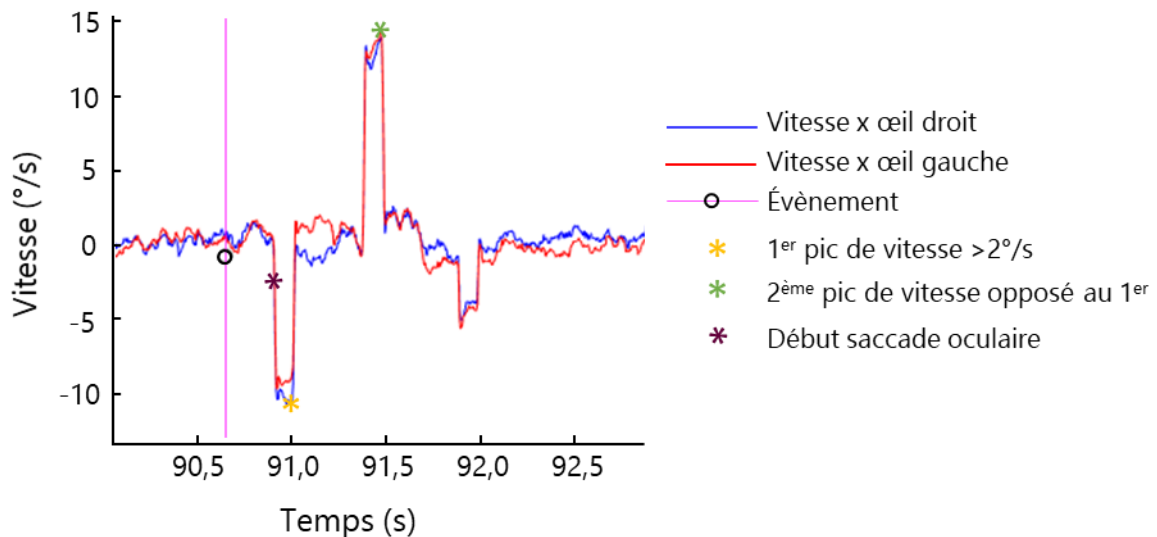


Figure 48 : Données oculométriques d'un participant pour un évènement

Il est affiché sur ce graphique, la vitesse horizontale ($^\circ$ /s) en fonction du temps (s), les pics de vitesse permettant de mesurer le temps de fixation pour un évènement et le début de la saccade oculaire permettant de mesurer la latence.

La perte d'information a été évaluée comme le nombre d'appui signalant la perte d'une information visuelle (de la cible, de la symbologie monoculaire ou du fond).

À la fin de chaque essai, il était demandé au participant de confirmer oralement la perte ou non d'une information visuelle.

L'évaluation du confort visuel s'est faite via le questionnaire à partir duquel le score sur chaque item a été moyenné entre tous les participants en fonction des caractéristiques du fond binoculaire.

La dominance oculaire de chaque participant a été déterminée par une série de tests détaillés dans le chapitre I.3.1.

I.2.1.7. Analyse statistique

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Statistica (Tibco Software™, Palo Alto, CA, Etats-Unis).

Pour évaluer si un effet d'entraînement était perçu lors de la deuxième session, une ANOVA impliquant le facteur session a été effectuée sur chacune des quatre variables dépendantes mesurées impliquant les 32 conditions (*i.e.* performance de suivi de cible, temps de détection, temps de fixation et temps de latence à l'apparition des événements).

Pour évaluer l'effet de l'œil de présentation, un t-test apparié a été réalisé entre les performances obtenues (*i.e.* performance de suivi de cible, temps de détection, temps de fixation, temps de latence à l'apparition des événements) avec la symbologie monoculaire sur l'œil droit et celles réalisées avec la symbologie monoculaire sur l'œil gauche pour chaque participant.

La dominance oculaire n'a pu être mise en concordance avec les résultats des performances étant donné le peu de différences significatives entre les performances réalisées avec l'image monoculaire sur l'œil droit et celles réalisées avec l'image monoculaire sur l'œil gauche de nos participants.

Les mesures optométriques, avant et après chaque session comprenant chacune 16 conditions, ont été comparées à l'aide de t-test appariés.

Une ANOVA à mesures répétées sur la performance de suivi de cible a été réalisée impliquant les facteurs des caractéristiques du fond (*i.e.* fréquences spatiales et contraste du fond binoculaire) et des caractéristiques de la symbologie monoculaire (*i.e.* contraste et pulsation).

Le score d'identification atteignant 98,8 % de bonnes réponses pour l'ensemble des participants, il n'a pas fait l'objet d'une analyse statistique.

Pour les variables associées au temps de détection et chacune des mesures oculométriques (*i.e.* temps de latence et temps de fixation), une ANOVA à mesures répétées par variable a été réalisée en impliquant les facteurs des caractéristiques du fond et des caractéristiques de la symbologie monoculaire, mais aussi du mode d'affichage des événements (*i.e.* monoculaire ou binoculaire, et petite ou grande excentricité). Les facteurs associés au mode d'affichage des événements ne pouvaient être intégrés) l'analyse du suivi de cible car cette variable est basée sur une moyenne associée à chaque condition et non un événement ponctuel de la condition.

Les pertes d'information signalées via le questionnaire et par l'appui d'une gâchette ainsi que le confort visuel n'ont pas mené à des analyses statistiques étant donné le faible échantillon de données associés.

I.2.2. Résultats

Il sera présenté, dans un premier temps, les résultats concernant l'effet d'entraînement étant donné la passation des participants en deux sessions distinctes espacées d'au moins un jour (voir paragraphe I.2.2.1). S'en suivra une présentation des

résultats évaluant les performances selon l'œil de présentation (voir paragraphe I.2.2.2). Les résultats des mesures optométriques feront également l'objet d'une partie de ce chapitre (voir paragraphe I.2.2.3).

À l'exception de l'analyse sur la performance de suivi de cible (voir paragraphe I.2.2.4.1), les analyses statistiques ont révélé des interactions multiples impliquant jusqu'à cinq facteurs lorsque tous les facteurs étaient inclus. C'est pourquoi, pour les variables « temps de détection », « latence » et « temps de fixation » (voir paragraphe I.2.2.4.3), nous avons décidé d'examiner l'effet des caractéristiques du fond binoculaire séparément, avant de nous pencher, sur l'effet des caractéristiques de la symbologie monoculaire et du mode d'affichage des événements.

Les résultats concernant les pertes d'information et le confort visuel sont présentées à la fin de ce chapitre (voir paragraphes I.2.2.4.4 et I.2.2.4.5).

I.2.2.1. Effet de l'entraînement

Les participants ayant réalisé deux sessions sur deux jours différents, il s'agissait dans un premier temps de vérifier qu'il n'y avait pas d'effet d'entraînement. Selon les résultats des ANOVA sur chacune des quatre variables mesurées, aucun effet « jour » n'a été retrouvé et donc nous pouvons considérer qu'il n'y a pas d'effet entraînement significatif (Tableau 3).

Tableau 3 : ANOVA évaluant l'effet d'entraînement

	F	<i>p-value</i>
Performance de suivi	F(1,17) = 12,11	0,079
Temps de détection	F(1,17) = 10,67	0,089
Temps de fixation	F(1,16) = 223,23	0,053
Temps de latence	F(1,16) = 8,24	0,268

I.2.2.2. Effet de l'œil de présentation

Quelles que soient les caractéristiques du fond binoculaire ou de la symbologie monoculaire, pour la variable performance de suivi, seuls quatre participants ont un effet de l'œil de présentation (Tableau 4).

Cinq participants ont un effet de l'œil de présentation de la symbologie monoculaire sur la variable temps de détection des événements (un seul parmi eux a également sa performance de suivi dépendante de l'œil de présentation) (Tableau 4).

Enfin, deux participants ont un effet de l'œil de présentation sur la variable temps de fixation mais aucun concernant la variable temps de latence (Tableau 4).

Tableau 4 : Répartition des participants en fonction de l'œil le meilleur

Lorsqu'une différence significative est trouvée entre les deux yeux, les valeurs de l'ensemble des participants ayant l'œil droit meilleur sont moyennées. Il en est fait de même lorsque l'œil gauche est le meilleur. Lorsqu'aucune différence n'est trouvée, les valeurs de l'œil droit de l'ensemble des participants n'ayant pas de différence sont moyennées. Il en est fait de même avec l'œil gauche.

Variable	Œil droit meilleur		Œil gauche meilleur		Non significatif		N
Erreur de suivi	N = 1		N = 3		N = 14		18
	OD	OG	OD	OG	OD	OG	
	Moyenne	8,15	10,06	11,15	10,31	11,08	
Écart-type	0,79	1,67	1,57	1,47	2,44	2,66	
Temps moyen de détection	N = 3		N = 2		N = 13		18
	OD	OG	OD	OG	OD	OG	
	Moyenne	825,71	900,43	894,29	835,79	802,87	
Écart-type	113,87	131,99	89,99	86,27	124,55	135,64	
Temps de fixation	N = 1		N = 1		N = 15		17
	OD	OG	OD	OG	OD	OG	
	Moyenne	286,91	319,10	406,35	329,52	322,32	
Écart-type	27,23	39,40	60,27	29,20	60,77	64,32	
Temps de latence	N = 0		N = 0		N = 17		17
	OD	OG	OD	OG	OD	OG	
	Moyenne				254,14	255,05	
Écart-type					21,67	21,17	

Etant donné le faible échantillon de participant qui possède une différence significative entre les deux yeux pour chaque variable, nous n'avons pas pu mettre en corrélation ces résultats avec la classification des tests de dominance oculaire (voir paragraphe I.3.2). Toutefois, pour chacun des participants ayant un œil significativement meilleur, il est montré leurs résultats aux différents tests de dominance (Tableau 5). On observe que pour sept des huit participants ayant un œil meilleur via au moins une des variables, il y a une correspondance entre ce dernier et l'œil dominant déterminé par le test de sensibilité au flou.

Tableau 5 : Répartition des participants en fonction de l'œil le meilleur de trois variables mesurées et des tests de dominance oculaire

Pour chaque variable, il est noté l'œil le meilleur lorsqu'il y en a un. Il est mis en regard de l'œil dominant trouvé via les différents tests de dominance. En gras, il est mis en valeur les cas où le meilleur œil sur les différentes variables est cohérent avec le test de dominance de sensibilité au flou.

	Performance de suivi	Temps de détection	Temps de fixation	Carte à trou	Acuité vision de loin	Worth	Sensibilité au flou	Rivalité de forme
S5	ND	OG	ND	OG	OG	ND	OG	OG
S6	OG	ND	ND	OG	ND	ND	OG	OG
S8	ND	OD	OD	OG	ND	OG	OG	OG
S9	OG	ND	∅	OD	ND	OD	OG	OG
S13	ND	OD	ND	OG	OD	OG	OD	OG
S15	OG	ND	ND	OG	OG	OG	OG	OG
S17	ND	OD	ND	OG	OD	ND	OD	OG
S18	OD	OG	OG	OD	OG	ND	OG	OD

I.2.2.3. Effet de la stimulation sur la fusion motrice

Les capacités de fusion ont été évaluées par les tests optométriques avant et après chaque session (Annexe 4). Aucune différence significative n'a été constatée indiquant que cette expérimentation ne modifie pas les capacités oculomotrices des participants.

I.2.2.4. Effet des caractéristiques des stimulations

I.2.2.4.1. Sur la performance de suivi de cible

L'ANOVA à mesures répétées sur la performance de suivi, considérant les caractéristiques du fond binoculaire et les configurations de la symbologie monoculaire, a révélé un effet des caractéristiques du fond ($F(3,51) = 14,46, p < 0,001$). Une analyse post-hoc a révélé un effet de la fréquence spatiale. La performance était significativement meilleure dans la condition de fond binoculaire à hautes fréquences spatiales ($10,33 \pm 1,95'$) par rapport à la condition à basses fréquences spatiales ($11,01 \pm 2,74'$) (Figure 49). Un effet de contraste a également été observé sur les conditions en basses fréquences spatiales. Les performances de suivi étaient significativement moins bonnes avec un contraste de 20 % ($11,37 \pm 2,57'$) contre 60 ($10,86 \pm 2,34'$) ou 100 % ($11,01 \pm 2,74'$). Aucune différence significative n'a été constatée entre les conditions de contraste de 100 % et 60 % (Figure 49).

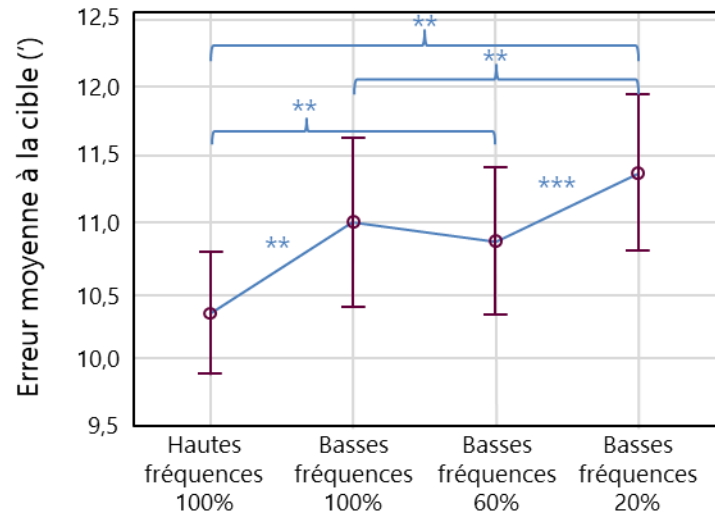


Figure 49 : Performance de suivi (erreur moyenne à la cible en minutes d'arc) en fonction des caractéristiques du fond binoculaire

Les barres verticales violettes représentent l'erreur standard. Une différence significative entre deux conditions est représentée en bleu par deux étoiles ($p < 0,01$) ou trois étoiles ($p < 0,001$).

L'ANOVA a également identifié un effet de la pulsation ($F(1,17) = 4,80$; $p = 0,043$). En effet, la performance de suivi est moins bonne quand la symbologie monoculaire pulsait ($10,99 \pm 2,50'$) par rapport aux conditions sans pulsation ($10,80 \pm 2,38'$) (Figure 50).

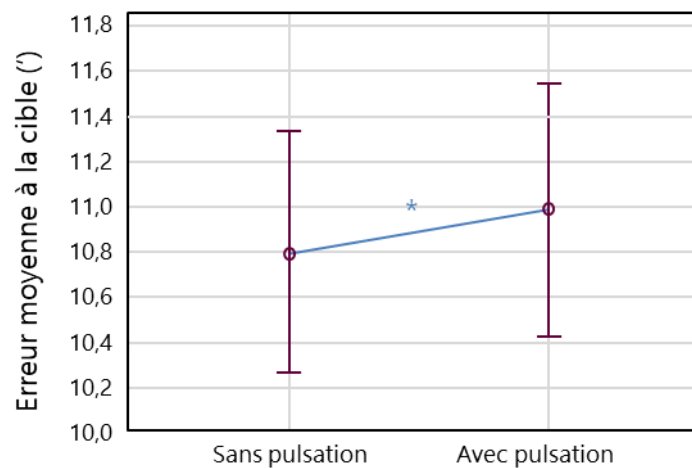


Figure 50 : Performance de suivi (erreur moyenne à la cible en minutes d'arc) en fonction de la pulsation

Les barres verticales violettes représentent l'erreur standard. Une différence significative entre deux conditions est représentée en bleu par une étoile ($p < 0,05$).

Le contraste de la symbologie monoculaire n'a pas eu d'effet sur les performances de suivi.

I.2.2.4.2. Sur le nombre d'erreurs d'identification des évènements

Le nombre d'erreurs d'identification recensé sur l'ensemble des participants considérant toutes les conditions est de 110 sur un total de 9216 évènements présentés. Le score d'identification atteignant 98,81 %, aucune analyse statistique n'a été effectuée pour évaluer la répartition des erreurs selon les caractéristiques des stimulations.

I.2.2.4.3. Sur les temps de détection, de latence et de fixation des évènements

I.2.2.4.3.1. Effet des caractéristiques du fond binoculaire

L'ANOVA à mesures répétées sur le temps de détection des évènements en fonction des caractéristiques du fond trouve un effet significatif ($F(3,51) = 7,90 ; p < 0,001$). L'analyse post-hoc révèle un effet du contraste mais pas des fréquences spatiales car aucun effet n'est trouvé entre les conditions hautes fréquences spatiales et basses fréquences spatiales à 100 % de contraste. Le temps de détection augmente de manière significative dans des conditions de fond binoculaire en basses fréquences spatiales à 100 % de contraste ($839,12 \pm 141,69$ ms) comparé aux conditions avec un contraste de 60 % ($810,24 \pm 118,03$ ms) et de 20 % ($805,58 \pm 124,69$ ms) (Figure 51).

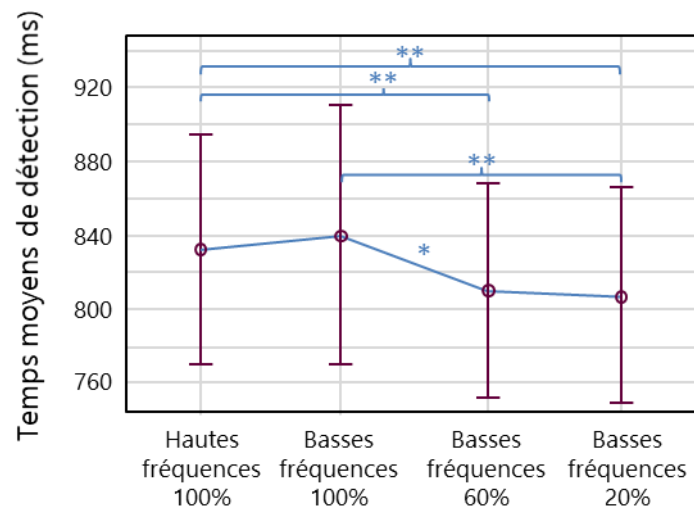


Figure 51 : Temps moyens de détection (en ms) des évènements en fonction des caractéristiques du fond binoculaire

Les barres verticales violettes représentent l'erreur standard. Une différence significative entre deux conditions est représentée en bleu par une étoile ($p < 0,05$) ou deux étoiles ($p < 0,01$).

L'ANOVA à mesures répétées sur la latence, compte tenu du facteur des caractéristiques du fond, n'a révélé aucun effet significatif.

En revanche, les caractéristiques du fond ont présenté un effet sur le temps de fixation ($F(3,48) = 17,88, p < 0,001$). L'analyse post-hoc a mis en évidence un effet de la

fréquence spatiale ; le temps de fixation était significativement plus court pour un fond binoculaire à basse fréquence et 100 % de contraste ($318,22 \pm 69,47$ ms) que pour un fond en hautes fréquences spatiales et 100 % de contraste ($340,10 \pm 69,85$ ms) (Figure 52). Un effet du contraste est également observé. Le temps de fixation était significativement plus court avec un contraste de 20 % ($303,92 \pm 64,79$ ms) contre 100 % ($318,22 \pm 67,47$ ms) en basses fréquences spatiales. Aucune différence significative n'a été constatée entre les conditions de contraste 100 % et 60 % ($312,00 \pm 61,44$ ms) et entre les conditions 60 % et 20 % (Figure 52).

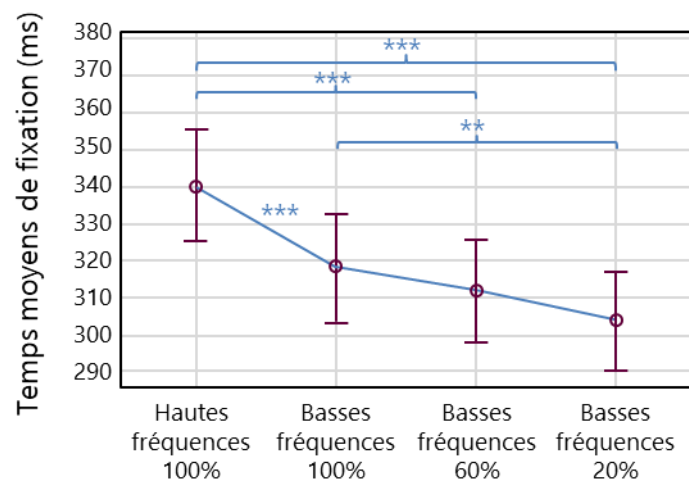


Figure 52 : Temps moyens de fixation (en ms) des évènements en fonction des caractéristiques du fond binoculaire

Les barres verticales violettes représentent l'erreur standard. Une différence significative entre deux conditions est représentée en bleu par deux étoiles ($p < 0,01$) ou trois étoiles ($p < 0,001$).

I.2.2.4.3.2. Effet des caractéristiques de la symbologie monoculaire et de l'affichage des évènements

L'impact des caractéristiques de la symbologie monoculaire (*i.e.* contraste et pulsation) et du mode d'affichage des évènements (*i.e.* monoculaire ou binoculaire et petite excentricité ou grande excentricité) sur le temps de détection, le temps de latence et le temps de fixation a été étudié pour chaque configuration environnementale :

- hautes fréquences spatiales et 100 % de contraste (HF-100 %) ;
- basses fréquences spatiales et 100 % de contraste (BF-100 %) ;
- basses fréquences spatiales et 60 % de contraste (BF-60 %) ;
- basses fréquences spatiales et 20 % de contraste (BF-20 %).

Les résultats des ANOVA à mesures répétées impliquant les facteurs associés aux caractéristiques de la symbologie monoculaire et au mode d'affichage des évènements pour la condition HF-100 % sont résumés dans le Tableau 6.

Tableau 6 : ANOVA à mesures répétées sur les temps de détection, de latence et de fixation selon les caractéristiques de la symbologie monoculaire et le mode d'affichage des événements en HF-100 %

Les paramètres d'affichage des événements sont présentés en lignes et les caractéristiques de la symbologie monoculaire en colonne. La colonne A, évalue l'interaction entre les caractéristiques d'affichage des événements et la pulsation de la symbologie. Lorsque le F est affiché, le test post-hoc révèle qu'une case bleu foncé indique un effet bénéfique de la pulsation par rapport à la même condition sans la pulsation. Une case bleu clair indique que la pulsation a eu un effet néfaste, tandis qu'une case comportant « NS » indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les conditions avec et sans pulsation. La colonne B, évalue les interactions entre l'affichage des événements et le contraste de la symbologie monoculaire. Lorsque le F est affiché, une case rose indique un effet bénéfique lorsque la symbologie est à contraste 1. Une case violet foncé indique un effet bénéfique lorsque la symbologie est à contraste 0,6, tandis qu'une case comportant « NS » indique qu'il n'y a pas de différence significative. Les colonnes C et D, montrent les interactions triples entre l'affichage des événements, la pulsation et le contraste de la symbologie monoculaire. La colonne Ca, indique les différences de performance entre la condition dans laquelle la symbologie monoculaire est pulsée ou non à contraste 1. La colonne Cb indique le même effet de pulsation à contraste 0,6. Dans les deux cas, une case bleu foncé indique un effet bénéfique de la pulsation par rapport à la même condition sans la pulsation. Une case bleu clair indique un effet nuisible de la pulsation, tandis qu'une case comportant « NS » indique qu'il n'y a pas de différence significative. La colonne Da indique les différences de performance entre un état où la symbologie monoculaire est à un contraste de 1 ou 0,6, avec la pulsation. La colonne Db présente les résultats pour la même condition, mais sans pulsation. Une case rose indique un effet bénéfique du contraste 1 par rapport au contraste 0,6. Une case violet foncé indique un effet bénéfique du contraste 0,6, tandis qu'une case comportant « NS » indique qu'il n'y a pas de différence significative. PE = petite excentricité (0,81°) ; GE = grande excentricité (2,00°). Lorsque l'interaction est non significative il est affiché « NS ». Lorsqu'aucune interaction n'est trouvée pour la variable, le symbole « Ø » est affiché.

HF100%									
Variables	Affichage événement		A. Pulsation avec/sans	B. Cont. 1/0,6	C. Pulsation avec/ sans		D. Cont. 1/0,6		
					a. Cont. 1	b. Cont. 0,6	a. Avec puls.	b. Sans puls.	
Temps de détection	Mono	PE	F(1,17)=7,82*	NS	F(1,17)=8,14*	NS	F(1,17)=8,14*	NS	
		GE	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
	Bino	PE	NS	F(1,17)=12,76*	F(1,17)=8,14*	NS	F(1,17)=8,14*	NS	
		GE	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
Temps de latence	Mono	PE	Ø	F(1,16)=6,81*	Ø	Ø	F(1,16)=6,81*		
		GE	Ø		Ø	Ø			
	Bino	PE	Ø		Ø	Ø			Ø
		GE	Ø		Ø	Ø			Ø
Temps de fixation	Mono	PE	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	
		GE	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	
	Bino	PE	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	
		GE	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	

Pour comprendre comment se lit ce tableau, prenons l'exemple de la condition en HF-100 % ci-dessus. Sur la ligne de la variable « temps de détection », la première case bleu clair (colonne A) indique une interaction double entre l'effet de la pulsation de la symbologie et

l’affichage des événements. Le test post-hoc révèle un temps de détection plus court sans pulsation de la symbologie monoculaire (la case est bleu clair), quelle que soit l’excentricité puisque les cases « PE » et « GE » sont réunies. Sur cette même interaction, le temps de détection pour les événements binoculaires n’est significativement pas différent entre « avec » et « sans pulsation ».

Autre exemple avec une interaction triple pour la variable « temps de détection ». La colonne « Ca » révèle une interaction triple entre le contraste, la pulsation et l’excentricité. Lorsque la symbologie monoculaire est à contraste maximal 1, le test post-hoc indique que les temps moyens de détection sont plus courts sans pulsation de la symbologie monoculaire (case bleu clair) qu’avec pulsation que l’affichage de l’évènement soit monoculaire ou binoculaire (même valeur de F dans ces deux cases) mais en petite excentricité seulement (« NS » en grande excentricité).

Ainsi, pour résumer, le Tableau 6 montre que, pour la condition HF-100 %, la performance globale est meilleure à contraste maximal 0,6 (colonne B : temps de détection et latence et colonne D : latence) qu’à 1. A ce niveau de contraste, la symbologie peut ou non être pulsée (colonne Cb). Si toutefois, le contraste venait à être mis à 1, alors il convient de ne pas faire pulser la symbologie (colonne Ca).

En BF-100 % (Tableau 7), la performance globale est meilleure à contraste maximal à 0,6 (colonne B : détection de temps et latence et colonne D : latence) qu’à 1. A ce niveau de contraste, il est préférable que la symbologie monoculaire soit pulsée (colonnes Cb et Da : temps de détection).

Tableau 7 : ANOVA à mesures répétées sur les temps de détection, de latence et de fixation selon les caractéristiques de la symbologie monoculaire et le mode d’affichage des événements en BF-100 %

La lecture du tableau se fait de la même manière que pour le Tableau 6.

BF100%								
Variables	Affichage évènement		A. Pulsation avec/sans	B. Cont. 1/0,6	C. Pulsation avec/ sans		D. Cont. 1/0,6	
					a. Cont. 1	b. Cont. 0,6	a. Avec puls.	b. Sans puls.
Temps de détection	Mono	PE	F(1,17)=21,60**	NS	NS	F(1,17)=13,70*	F(1,17)=13,70*	NS
		GE		F(1,17)=10,57*				
	Bino	PE	NS	F(1,17)=10,57*				
		GE		NS				
Temps de latence	Mono	PE	F(1,16)=5,20*	∅	∅	∅	F(1,16)=5,20*	∅
		GE		∅				
	Bino	PE		∅				
		GE		∅				
Temps de fixation	Mono	PE	∅	∅	∅	∅	∅	∅
		GE		∅				
	Bino	PE		∅				
		GE		∅				

Pour la condition BF-60 % (Tableau 8), la performance est maintenue avec une symbologie monoculaire de contraste maximal 1 (colonne B : temps de détection et colonne D : temps de détection et temps de fixation) et pulsée (colonnes Ca : temps de fixation). Elle est également maintenue à contraste maximal 0,6 (colonnes B et D : temps de latence), et non pulsée (colonne Cb : temps de fixation).

Tableau 8 : ANOVA à mesures répétées sur les temps de détection, de latence et de fixation selon les caractéristiques de la symbologie monoculaire et le mode d'affichage des événements en BF-60 %

La lecture du tableau se fait de la même manière que pour le Tableau 6.

BF60%								
Variables	Affichage événement		A. Pulsation avec/sans	B. Cont. 1/0,6	C. Pulsation avec/ sans		D. Cont. 1/0,6	
					a. Cont. 1	b. Cont. 0,6	a. Avec puls.	b. Sans puls.
Temps de détection	Mono	PE	NS	F(1,17)=7,21*	NS		F(1,17)=7,21*	
		GE		NS	F(1,17)=6,56*		NS	
	Bino	PE	F(1,17)=12,49*	NS	NS		NS	
		GE		NS	F(1,17)=6,56*		NS	
Temps de latence	Mono	PE	∅	NS	∅	∅	NS	
		GE	∅	F(1,16)=4,74*	∅	∅	F(1,16)=4,74*	
	Bino	PE	∅	NS	∅	∅	NS	
		GE	∅	F(1,16)=4,74*	∅	∅	F(1,16)=4,74*	
Temps de fixation	Mono	PE	∅	∅	NS	NS	F(1,16)=5,87*	F(1,16)=5,87*
		GE	∅	∅	NS	NS	NS	NS
	Bino	PE	∅	∅	F(1,16)=5,87*	F(1,16)=5,87*	F(1,16)=5,87*	F(1,16)=5,87*
		GE	∅	∅	NS	NS	NS	NS

Enfin, pour la condition BF-20 % (Tableau 9), la performance est maintenue avec une symbologie monoculaire non pulsée à contraste maximal 1 (colonne Ca : temps de détection, latence et temps de fixation et colonne Db : latence et temps de fixation). Elle est également maintenue avec une symbologie monoculaire de contraste maximal 0,6 et pulsée (colonne Cb : latence et temps de fixation et colonne Da : temps de détection, latence et temps de fixation).

Tableau 9 : ANOVA à mesures répétées sur les temps de détection, de latence et de fixation selon les caractéristiques de la symbologie monoculaire et le mode d'affichage des événements en BF-20 %

La lecture du tableau se fait de la même manière que pour le Tableau 6.

BF20%								
Variables	Affichage événement		A. Pulsation avec/sans	B. Cont. 1/0,6	C. Pulsation avec/ sans		D. Cont. 1/0,6	
					a. Cont. 1	b. Cont. 0,6	a. Avec puls.	b. Sans puls.
Temps de détection	Mono	PE	F(1,17)=13,79*	∅	F(1,17)=11,46*	NS	F(1,17)=11,46*	NS
		GE	NS	∅				
	Bino	PE	NS	∅				
		GE	NS	∅				
Temps de latence	Mono	PE	∅	∅	NS	NS	NS	NS
		GE	∅	∅	NS	NS	NS	NS
	Bino	PE	∅	∅	F(1,16)=8,70*	F(1,16)=8,70*	F(1,16)=8,70*	F(1,16)=8,70*
		GE	∅	∅	NS	NS	NS	NS
Temps de fixation	Mono	PE	∅	∅	F(1,16)=6,04*	F(1,16)=6,04*	F(1,16)=6,04*	F(1,16)=6,04*
		GE	∅	∅	NS	NS	NS	NS
	Bino	PE	∅	∅	F(1,16)=6,04*	F(1,16)=6,04*	F(1,16)=6,04*	F(1,16)=6,04*
		GE	∅	∅	NS	NS	NS	NS

Quelle que soit la condition, dans toutes les comparaisons effectuées à propos de l'excentricité, les temps de détection, de latence et de fixation étaient plus courts pour les événements à faible excentricité comparés à ceux présentés avec une grande excentricité. Les temps étaient plus courts dans 67 % des cas lorsque l'événement était affiché en binoculaire par rapport aux événements affichés en monoculaire.

I.2.2.4.4. Sur la perte d'information

Seuls cinq des dix-huit participants ont signalé une perte d'information puis l'ont confirmée oralement mais le nombre recensé n'a pas été suffisant pour être analysé. Le temps d'appui cumulé pour signaler une perte d'information correspondant à 0,16 % du temps total alloué à l'ensemble des conditions sur les 18 participants.

I.2.2.4.5. Sur le confort visuel

Le questionnaire (Annexe 2) n'a révélé que très peu de fatigue visuelle subjective ou de symptômes et les scores n'ont jamais dépassé 2/5 (Tableau 10).

Tableau 10 : Score moyen attribué par les participants par item de confort visuel

N = 18, 0 = aucune gêne, 5 = une gêne très intense.

Confort visuel	HF-100 %	BF-100 %	BF-60 %	BF-20 %
Fatigue visuelle	0,69 ± 0,97	0,78 ± 1,05	0,68 ± 0,97	0,83 ± 1,09
Maux de tête	0,19 ± 0,46	0,18 ± 0,42	0,15 ± 0,39	0,15 ± 0,41
Vision double	0,05 ± 0,25	0,04 ± 0,20	0,07 ± 0,31	0,11 ± 0,39
Vision trouble	0,25 ± 0,60	0,45 ± 0,88	0,45 ± 0,89	0,45 ± 0,96
Tiraillements oculaires	0,45 ± 0,86	0,47 ± 0,79	0,41 ± 0,77	0,36 ± 0,70

I.2.3. Discussion

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'impact de différentes conditions d'affichage sur les performances et le confort visuel lors de l'utilisation d'un système de réalité augmentée monoculaire.

Nous avons donc évalué l'effet des caractéristiques du fond binoculaire, de la symbologie monoculaire et du mode d'affichage d'un événement sur les performances et le confort visuel et, par conséquent, sur la rivalité binoculaire. À l'aide d'un dispositif stéréoscopique expérimental, nous avons mesuré les variables suivantes : la performance de suivi d'une cible binoculaire par le déplacement de la symbologie monoculaire ; la détection d'événements monoculaires et binoculaires ; le temps de latence et de fixation et le confort subjectif. Toutes ces variables ont été mesurées en fonction de plusieurs niveaux de fréquence spatiale et de contraste du fond binoculaire, avec une symbologie monoculaire ayant différents niveaux de contraste et qui peut (ou non) stimuler l'attention exogène (par l'intermédiaire d'une pulsation). Cela a conduit à évaluer 16 conditions différentes avec la symbologie affichée sur chaque œil, soit 32 conditions au total.

I.2.3.1. Impact de l'œil de présentation

Dans un premier temps, ces 32 conditions ont été évaluées en fonction de l'œil de présentation (Tableau 4). Toutes conditions confondues, nous avons testé les différences de performance lorsque l'image monoculaire était présentée sur l'œil droit et lorsqu'elle était présentée sur l'œil gauche. Seulement quatre participants obtiennent une meilleure performance de suivi avec un œil qu'avec l'autre. Un seul parmi ces quatre a également une différence de temps de détection lorsque la symbologie est placée sur un œil (Tableau 5). Il s'avère que ce n'est pas le même œil qui performe pour ce participant. Quatre participants ont également des temps de détection plus courts avec la symbologie sur un œil que sur l'autre et pour deux autres, c'est le temps de fixation qui diffère. Bien que peu de participants aient eu une différence notable de performance entre leurs deux yeux, on a observé que pour 87,5 % de ces participants, le meilleur œil pouvait être prédit via le test de la sensibilité au flou (Tableau 5). Ce test, considéré comme évaluant la sensorialité, est rapide et facile à

mettre en œuvre. Il conviendra de déterminer si son intérêt se confirme en situation écologique.

I.2.3.2. Effets d'un conflit interoculaire de type réalité augmentée monoculaire sur la perception et les performances de pilotage

Peu de participants ont signé des pertes d'information (*i.e.* 5) et elles représentent un temps infime vis-à-vis de la totalité de l'exposition (*i.e.* 0,16 %). Les stimulations et les tâches choisies dans cette étude semblent avoir permis de limiter le phénomène de suppression, les perturbations attribuées à la rivalité binoculaire se limitant à des baisses de performances dépendantes des caractéristiques du fond binoculaire et de l'affichage. Les faibles pertes d'information peuvent s'expliquer par la cohérence entre la symbologie (un anneau) et la cible (un cercle) qui limiterait la rivalité (Blake et Boothroyd, 1985).

Outre la faible part des pertes d'information, on notera que les stimulations et les tâches choisies n'ont pas engendré de perturbation de la fusion motrice. Ceci peut directement s'expliquer par les faibles pertes d'information qui suggèrent que la fusion sensorielle a pu se mettre en œuvre ce qui a permis à la fusion motrice de pouvoir également opérer (Semmlow, Hung, et Ciuffreda, 1986). Ceci est d'ailleurs cohérent avec le faible score de vision double relevé par les participants (Tableau 10). En effet, si la vision n'est ni double ni supprimée, cela suggère que la vision a été fusionnée.

Le nombre d'erreurs d'identification recensé sur l'ensemble des participants considérant toutes les conditions est très faible (*i.e.* 1,2 %) et l'exposition n'a conduit qu'à des plaintes contenues.

La faible part de perte d'information, l'absence de modification motrice, le faible nombre d'erreurs d'identification et le bon confort suggèrent que les stimulations et les tâches choisies ont été peu contraignantes et n'ont pas posé de grosses difficultés aux participants. Bien que non écologique, cette étude permettait malgré tout de reproduire un conflit interoculaire. Ces résultats sont donc encourageant quant à l'acceptation d'un système créant un conflit interoculaire de ce type par les utilisateurs. Toutefois, le fait de ne pas avoir identifié les symptômes, qui selon certains auteurs sont caractéristiques de la rivalité binoculaire en réalité augmentée monoculaire (Behar et al., 1990 ; Hershberger et Guérin, 1975 ; Rash et al., 2009) peut aussi suggérer que certains choix méthodologiques n'ont pas permis de rendre compte de l'ensemble des contraintes auxquelles expose la réalité augmentée monoculaire, ce qui a plus limité la rivalité binoculaire que ce que nous aurions prédits.

I.2.3.3. Influence des caractéristiques du fond binoculaire

Nous avons ensuite évalué l'effet de la fréquence spatiale du fond binoculaire sur le confort et sur les performances. Dans la deuxième étude de Hershberger et Guérin (1975), la

performance de suivi de cible est mesurée en fonction de deux types de HMD (« bon » « ou faible ») sur un fond binoculaire identique. Il est montré que quelle que soit la différence de fréquences spatiales entre l'image monoculaire et le fond, la performance de suivi n'est pas altérée. Nos résultats ne sont donc pas en accord avec ces auteurs puisqu'on trouve de meilleures performances de suivi de cible avec un fond en hautes fréquences spatiales par rapport à un fond en basses fréquences spatiales (Figure 49). La symbologie étant considéré en haute fréquence du fait de ses bords, ces résultats peuvent suggérer, comme Wolfe (1983), que plus les fréquences spatiales des stimuli en conflit sont hautes, moins il y aura de rivalité binoculaire. La première étude de Hershberger et Guérin (1975) avait mis en évidence l'effet d'une différence de fréquence spatiale en montrant que plus elle était grande entre les éléments en conflit, plus l'élément ayant la haute fréquence spatiale prédominait. Les résultats concernant la variable temps de fixation soutiennent également cet argument. En effet, le temps de fixation des événements en haute fréquence spatiale est significativement plus court lorsque le fond est en basses fréquences spatiales par rapport aux conditions en haute fréquence spatiale (Figure 52). L'évènement en haute fréquence spatiale dominera le fond qui est lui en basses fréquences spatiales impliquant ainsi moins de rivalité et donc des temps de fixation plus courts.

Concernant l'impact du contraste, il s'avère que les études évaluant la prédominance de l'image augmentée monoculaire par rapport au fond binoculaire faisaient varier uniquement le contraste de l'image monoculaire sans faire varier le contraste du fond binoculaire (Browne, Winterbottom, et Patterson, 2010 ; Hershberger et Guerin, 1975 ; Winterbottom et al., 2015). Notre étude a comparé, l'impact de la variation de contraste du fond binoculaire et de la symbologie monoculaire sur la rivalité binoculaire. Dans un premier temps, la variable performance de suivi a révélé un effet du contraste du fond mais pas de la symbologie monoculaire. Quel que soit le contraste de la symbologie monoculaire, la performance de suivi est meilleure en condition de fond à BF-100 % de contraste par rapport aux conditions de fond à BF-20 % de contraste (Figure 49).

Pendant la tâche, la cible a une dimension telle que la symbologie ne se superpose généralement pas au fond mais reste limitée à la cible. Cette dernière a une luminance moyenne qui ne varie pas selon les conditions du fond (13 cd/m^2). Comme nos résultats montrent que la performance est indépendante du contraste de la symbologie et que la cible a une luminance fixe, ce n'est pas la différence de contraste entre ces deux éléments qui dégrade la performance comme pouvait le laisser présager certains auteurs (Blake et Camisa, 1978 ; Levelt, 1965 ; Peli, 1990). Ainsi, la dégradation de la performance de suivi selon le contraste du fond serait imputable à la différence de contraste entre la cible et le fond. En effet, il se peut qu'il soit plus difficile de suivre une cible sur un fond possédant un faible contraste qu'une cible sur un fond de fort contraste.

Le contraste des événements à détecter ne varie pas quelles que soient les conditions (fixé à 100 %). Dans les conditions HF-100 % et BF-100 %, il n'y a donc pas de différences de

contraste entre les événements et le fond binoculaire. Le temps de détection des événements y est plus long que dans la condition BF-20 % pour laquelle on observe une différence de contraste entre le fond et l'évènement (Figure 51). Ce résultat corrobore avec les études évaluant des images dichoptiques dans lesquelles l'image la plus contrastée dominera la perception (Blake et Camisa, 1978 ; Levelt, 1965). Il est en accord également avec les résultats de Winterbottom et al. (2015) qui constatent de meilleures performances de détection de cible de fort contraste sur un fond à faible contraste. Concernant le temps de fixation, plus il y a de différences de contraste entre le fond binoculaire et l'évènement, moins de temps est passé par le participant à la fixation de l'évènement (Figure 52). Ces résultats sur les temps de fixation en fonction du contraste n'ont pas été testés par d'autres en réalité augmentée monoculaire mais sont en accord avec les résultats obtenus avec des images vues en binoculaires. Plus le stimulus est contrasté, plus court sera le temps passer à le fixer pour l'identifier (Näsänen, Ojanpää, et Kojo, 2001).

I.2.3.4. Influence des caractéristiques d'affichage

Nous avons ensuite étudié l'impact de l'affichage des événements sur les performances. Winterbottom et al. (2015) utilisent une image monoculaire en réalité augmentée superposée à un fond binoculaire. La tâche consistait à détecter et identifier des événements pouvant apparaître soit sur le fond, soit sur l'image monoculaire. Les auteurs ont rapporté que la performance était meilleure lorsque les événements apparaissaient sur le fond binoculaire. Notre étude évaluait cette performance selon quatre conditions de fond binoculaire, représentant différentes conditions de vision, en présentant les événements en monoculaire ou en binoculaire. Quelles que soit les caractéristiques du fond binoculaire, la présentation de l'évènement superposé au fond binoculaire conduit le plus souvent à des temps de détection plus longs lorsque l'évènement est monoculaire que lorsqu'il est binoculaire. Nos résultats sont donc en accord avec ceux de Winterbottom et al. (2015) qui n'ont testé l'impact des performances que dans des conditions de vision optimales.

Comme en condition naturelle de vision (Carrasco et al., 1995), en situation de conflit interoculaire, les performances sont meilleures pour détecter un événement en petite excentricité qu'en grande excentricité.

Bien que nos résultats démontrent des différences entre les temps de détection des événements monoculaires et binoculaires, et entre les événements présentés à petite et grande excentricité, ces paramètres en vol, ne sont pas sous le contrôle de l'observateur et ne peuvent être anticipés. Par conséquent, nos résultats ont été examinés afin de déterminer quelle configuration d'affichage de la symbologie monoculaire (contraste et pulsation) il est préférable de considérer dans chaque configuration environnementale. Globalement, pour limiter l'impact de la rivalité binoculaire sur les performances, il faut afficher la symbologie monoculaire à faible contraste et pulsée (Tableau 6, Tableau 7, Tableau 9). La seule exception qui infirmerait cela, est la condition BF-60 % où il serait préférable d'utiliser une symbologie

monoculaire pulsée à contraste élevé ou non pulsée en faible contraste (Tableau 8). La contribution positive de la pulsation doit être nuancée car elle semble néanmoins dégrader la performance de suivi de cible. Ces résultats sont préliminaires et doivent être confrontés à une scène plus écologique pour déterminer avec précision les conditions où il convient d'ajuster la configuration de l'affichage.

Alors que l'attention endogène étudiée par Winterbottom et al. (2006) n'a pas été évaluée dans notre étude, l'attention exogène (caractérisée par la symbologie monoculaire pulsée) semble limiter l'impact de la rivalité binoculaire si la symbologie monoculaire est bien caractérisée en terme de contraste. Il convient de noter cependant, que l'attention exogène peut avoir été stimulée par la présence des événements plutôt que par la présence de la pulsation. Ce pourrait donc être plutôt par ce biais que l'attention exogène aurait agi et ainsi contribué aux faibles pertes subjectives de la symbologie monoculaire. Il s'agirait donc de vérifier le rôle de la pulsation dans une situation écologique en limitant les autres sources de stimulation de l'attention exogène. Les performances aux deux tâches (*i.e.* suivi de cible et détection) sont globalement meilleures lorsque la symbologie monoculaire est sans pulsation (Figure 49) pour le suivi de cible ou à faible contraste pour le temps de détection (Tableau 6B, Tableau 7B) que lorsqu'il est à contraste élevé et soumis à pulsation (Tableau 6Ca/Da, Tableau 7Da, Tableau 9Da). Ce résultat est peut-être dû au fait que la symbologie monoculaire à contraste élevé dominerait à tel point qu'elle empêche la détection d'événements environnants (Hershberger et Guerin, 1975). En ce qui concerne la pulsation en contraste élevé, le fait que la luminance de la symbologie monoculaire approche celle de la cible (13 cd/m^2) pendant un court instant, cela pourrait entraîner sa perte visuelle, ce qui pourrait créer un stress sur la tâche de suivi de cible et ainsi dégrader la capacité de la personne à détecter des événements. Il serait intéressant de tester une gamme de luminance ou une luminance moyenne différente de celle de la cible permettant d'éviter une perte totale d'information, afin de vérifier si les résultats obtenus à contraste élevé peuvent être améliorés. D'un point de vue qualitatif, nos conclusions utilisant des scènes dynamiques sont en grande partie similaires à celles rapportées par Hershberger et Guérin (1975) qui eux utilisent des scènes statiques.

I.3. Impact de la dominance oculaire

Comme évoqué précédemment, l'impact de la dominance oculaire lors de l'utilisation de système de réalité augmentée monoculaire ne relève pas d'un consensus. L'objectif de cette étude est de vérifier si tester l'impact de la dominance oculaire motrice dans les études utilisant des systèmes de réalité augmentée monoculaire est bien judicieux du fait de la rivalité binoculaire qu'ils suscitent. Il s'agit également de déterminer si les tests de dominance oculaire sont interchangeables. Nous avons donc évalué si les différents tests de dominance oculaire donnent les mêmes résultats bien que selon la littérature, ils soient caractérisés selon

trois types de dominance (Coren et Kaplan, 1973 ; Gronwall et Sampson, 1971 ; Li et al., 2010 ; Pointer, 2012 ; Suttle et al., 2009 ; Yang, Blake, et McDonald, 2010).

I.3.1. Méthode

I.3.1.1. Participants

Trente-trois participants (dont dix-huit ayant passé l'expérimentation précédente) ont été recrutés (20 femmes et 13 hommes) âgés de 21 à 60 ans (moyenne $33,90 \pm 10,00$ ans). Ils devaient respecter les mêmes critères d'inclusion que précédemment.

L'étude a été menée conformément à la Déclaration d'Helsinki et a satisfait aux exigences légales locales (N IDRCB : 2018-A01331-54).

I.3.1.2. Tests de dominance oculaire

I.3.1.2.1. Acuité vision de loin

Une mesure de l'acuité vision de loin de chaque œil a été effectuée à six mètres dans des conditions standards d'éclairage (551 lux). La mesure a utilisé une échelle d'optotypes en anneaux de Landolt à progression décimale (Figure 53). L'œil ayant le meilleur score d'acuité a été déterminé comme étant l'œil dominant. En cas d'égalité, le participant recevait une note de 0.

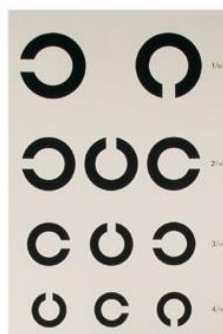


Figure 53 : Echelle d'optotypes en anneaux de Landolt permettant de mesurer l'acuité vision de loin

I.3.1.2.2. Acuité vision de près

Une mesure de l'acuité vision de près de chaque œil a été effectuée à 0,40 m dans des conditions standards d'éclairage (551 lux), avec un éclairage supplémentaire dirigé vers le test. Une échelle d'optotypes morphoscopique à progression logarithmique a été utilisée pour réaliser la mesure (Figure 54). L'œil ayant le meilleur score d'acuité a été déterminé comme étant l'œil dominant. En cas d'égalité, le participant recevait une note de 0.

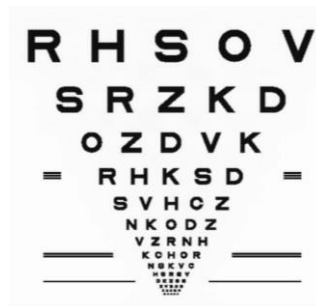


Figure 54 : Echelle d'optotypes morphoscopiques permettant de mesurer l'acuité vision de près

I.3.1.2.3. Point le plus proche de convergence (PPC)

Cette mesure a été effectuée dans des conditions standards d'éclairage (551 lux). Chaque participant devait fixer binoculairement un stylo lampe se déplaçant à une vitesse de 1 à 2 cm/s (Scheiman et al., 2003) sur 0,50 m tenu devant leur nez dans le plan sagittal (Abraham, Srinivasan, et Thomas, 2015). L'œil qui conservait la fixation le plus longtemps était considéré comme l'œil dominant. La mesure était effectuée une seule fois (Li et al., 2010).

I.3.1.2.4. Rivalité de forme

La dominance oculaire sensorielle définit l'œil dominant comme celui devant lequel l'image affichée à la plus grande prédominance lors de la présentation d'images dichoptiques. Ce test s'inscrit dans ce type de mesure et a été développé sur la base des méthodes des études de Coren et Kaplan (1973) et Handa et al. (2004). La mesure a été effectuée avec un éclairage limité par celui des écrans dont la luminance maximale est de 120,00 cd/m² (Handa et al., 2004).

I.3.1.2.4.1. Matériel

Les participants étaient assis devant un stéréoscope à miroir et stabilisés au niveau du front et du menton (Handa et al., 2004). Le stéréoscope se compose de deux écrans LCD de 22 pouces (ViewSonic®, Brea, CA, Etats-Unis) d'une fréquence d'affichage de 120 Hz dont leur luminance a été égalisée, et de deux paires de miroirs défecteurs inclinés à 45° par rapport au plan sagittal (Figure 55). Le participant était placé à 0,50 m de l'écran (Bourassa, 1996), et percevait un champ de vision minimum de 18,30° horizontalement et de 21,17° verticalement (Figure 55). Le participant devait indiquer ce qu'il voyait par le biais d'un boîtier de réponse. La durée de la visibilité de chaque stimulus était enregistrée.

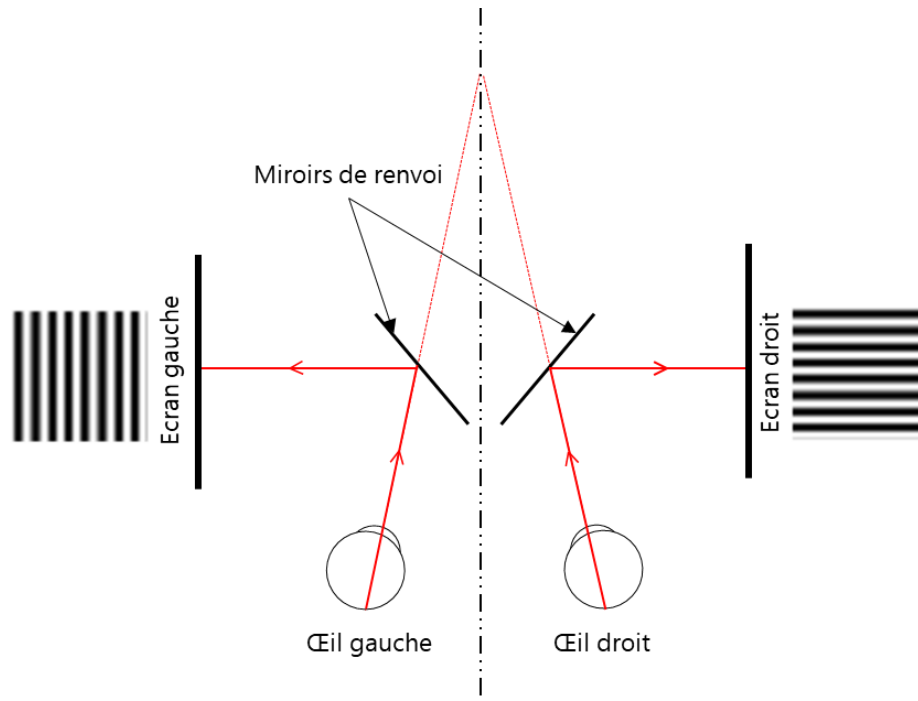


Figure 55 : Chemins optiques empruntés lors de l'utilisation d'un stéréoscope à miroirs

Des stries verticales étaient présentées à l'œil gauche et des stries horizontales à l'œil droit.

I.3.1.2.4.2. Stimuli

Les stimuli étaient des stries sinusoïdales orientées à 0° pour l'œil droit, et à 90° pour l'œil gauche (Coren et Kaplan, 1973). Les luminances maximale et minimale du fond étaient respectivement de $120,00$ et $0,80 \text{ cd/m}^2$ et la luminance moyenne était de 42 cd/m^2 (Yang, Blake, et McDonald, 2010). Le contraste et la fréquence spatiale étaient fixés à 100% , et à 4 cycles/deg , respectivement. Quatre présentations de dix secondes chacune ont été faites, avec une pause de trois secondes entre chaque. La procédure était répétée trois fois.

I.3.1.2.4.3. Procédure

Avant l'essai, il était montré aux participants l'image qui serait présentée à chaque œil et ce que peut représenter un mélange des deux images (Handa et al., 2004). Il était demandé au participant d'appuyer sur un bouton horizontal du boîtier de réponse lorsque la cible perçue se composait exclusivement de stries horizontales, et sur un bouton vertical lorsque la cible composée de stries verticales était exclusivement perçue. Dans le cas d'une perception mixte, il leur a été demandé de n'appuyer sur aucun bouton (Li et al., 2010). L'œil dominant était déterminé comme celui qui ayant un score de prédominance le plus élevé sur la totalité des répétitions.

I.3.1.2.5. Carte à trou

La mesure a été effectuée dans des conditions standards d'éclairage (551 lux). Les participants devaient tenir une carte perforée (ocular dominance test, usaeyes.org) avec les

deux mains à bout de bras, centrée devant eux. Les deux yeux ouverts, ils devaient fixer, à travers le trou central de la carte, une lettre sur la plus petite ligne d'acuité déchiffable à six mètres (Pointer, 2012). Tout en continuant de fixer la lettre, ils devaient rapprocher la carte vers eux jusqu'à ce qu'elle touche leur visage. L'œil derrière le trou était considéré comme l'œil dominant (Yang, Blake, et McDonald, 2010). La procédure était répétée trois fois (Pointer, 2012).

I.3.1.2.6. Worth

La mesure a été effectuée sous une lumière ambiante faible (5 lux). Le test de Worth est constitué de quatre points lumineux et a été présenté à 0,33 m, légèrement en dessous de la ligne de visée du participant (Figure 56). Ce dernier portait des lunettes anaglyphes rouge/vert. Le filtre vert était placé sur l'œil gauche et le rouge sur l'œil droit. Le test se compose d'un point rouge en haut, de deux points vert sur les côtés et d'un point blanc en bas. Le participant muni des anaglyphes devait déterminer la couleur du point le plus bas. S'il le percevait blanc, aucune dominance n'était enregistrée, s'il était rouge, l'œil droit était considéré comme dominant, s'il était vert, l'œil gauche était considéré comme dominant (Seijas et al., 2007). La mesure était effectuée une seule fois (Li et al., 2010).



Figure 56 : Test de Worth

I.3.1.2.7. Sensibilité au flou

La mesure a été effectuée dans des conditions standards d'éclairage (551 lux). Il a été demandé au participant de fixer binoculairement la plus petite ligne d'acuité déchiffable à six mètres (Pointer, 2012). Une lentille de +1,50 δ a été placée devant l'œil droit puis retirée. Il a ensuite été demandé au participant de donner une évaluation subjective de sa vision avec le verre sur une échelle visuelle analogique (EVA) (Figure 57) (Kollbaum, Jansen, et Rickert, 2012). L'évaluation a ensuite été faite avec la lentille placée devant l'œil gauche (Pointer, 2012). Trois mesures ont été effectuées pour chaque œil et la moyenne a été calculée. L'œil présentant la plus forte moyenne d'évaluation subjective sur l'échelle EVA était considéré comme l'œil dominant.

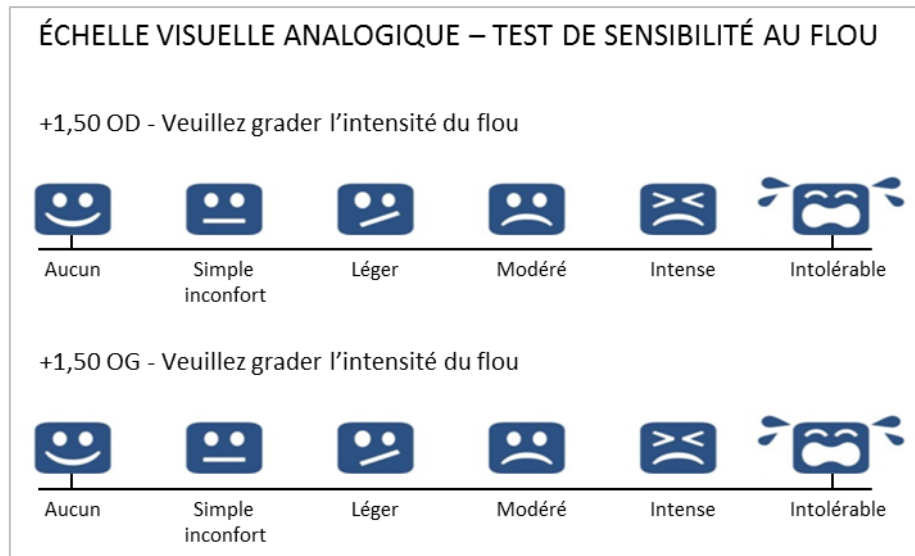


Figure 57 : Echelle visuelle analogique utilisée pour le test de sensibilité au flou

I.3.1.2.8. Sensibilité au mouvement

Ce test a été développé sur la base de la méthode de l'étude de Li et al. (2010), avec un éclairage limité par celui des écrans dont la luminance maximale est de $120,00 \text{ cd/m}^2$.

I.3.1.2.8.1. Matériel

Le matériel utilisé était le même que pour l'étude sur la rivalité de forme (le participant était assis devant un stéréoscope à miroir, stabilisé par une mentonnière à 0,50 m de l'écran). Un clavier était utilisé comme outil de réponse à la tâche.

I.3.1.2.8.2. Stimuli

Cent points lumineux étaient affichés avec un contraste de 100 % sur un fond d'une luminance moyenne de 35 cd/m^2 (Figure 58). Chaque point avait un rayon de $0,50^\circ$ et se déplaçait à une vitesse de $6^\circ/\text{s}$ (Li et al., 2010). Les points avaient une durée de vie limitée, de sorte qu'à chaque rafraîchissement de l'écran, chaque point avait 5 % de chances de disparaître et de réapparaître ailleurs (Li et al., 2010). Les points étaient présentés dans un cercle de $9,00$; celui-ci était entouré d'un carré, présenté de manière binoculaire. Des lignes de nonius et un point de fixation central de $0,35^\circ$ étaient également affichés binoculairement pour faciliter la fusion (Li et al., 2010) (Figure 58). Pour éviter toute interaction entre les points de stimulation et le point de fixation central, les points ne devaient pas passer par la région centrale (rayon de $2,00^\circ$). Tous les points qui passaient par cette région disparaissaient et réapparaissaient de l'autre côté avec un retard calculé pour maintenir une vitesse constante (Li et al., 2010). Dans un œil étaient affichés des points « signaux » qui se déplaçaient tous dans la même direction (vers la droite ou vers la gauche) et dans l'autre œil, un nuage de points se déplaçait aléatoirement. Chaque stimulation était présentée pendant 1000 ms au

maximum, et maintenue pendant 250 ms après la réponse, avant le début de la stimulation suivante (Li et al., 2010).

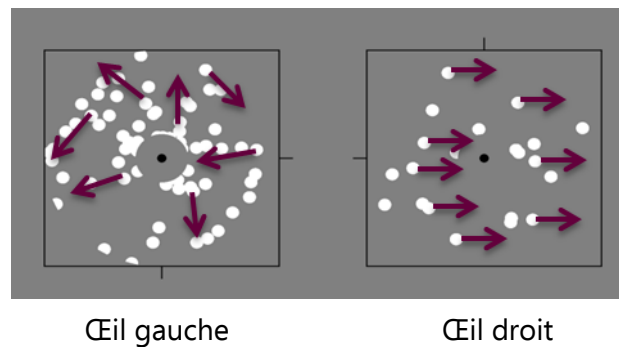


Figure 58 : Représentation des images de l'œil droit et gauche vues par le sujet lors de la réalisation de la tâche au test de sensibilité au mouvement

Les flèches matérialisent les mouvements des points. Le participant devait indiquer la direction des points signaux, ici émis sur l'œil droit.

La tâche consistait à identifier la direction des points signaux par l'appui sur la flèche droite du clavier s'ils se dirigeaient à droite, ou la flèche gauche s'ils se dirigeaient à gauche. Le nombre de points signaux changeait d'un test à l'autre, sur la base d'un escalier psychophysique descendant "trois bonne réponses, une mauvaise réponse", avec une marche de 50 % de points en moins pour la première bonne réponse, puis de 25 %. Au début de chaque escalier, 100 points signaux dans un œil et 0 point aléatoire dans l'autre étaient présentés. Au fur et à mesure que les points étaient retirés de la population des points signaux, ils passaient dans la population de points aléatoires, et vice versa (Li et al., 2010). Un seuil de 79 % de réponses correctes (perception correcte de la direction du mouvement des points signaux) a été fixé.

Chaque escalier était donc composé de six inversions, et le nombre de points signaux lors des cinq dernières inversions ont été moyennés pour obtenir un seuil. Lors de chaque mesure de seuil, deux escaliers ont été entrelacés de manière aléatoire, l'un mesurant le seuil lorsque les points signaux étaient présentés à l'œil gauche, et l'autre lorsqu'ils étaient présentés à l'œil droit. En entrelaçant les escaliers, les participants ne pouvaient pas détecter l'œil qui voyait les points signaux. La mesure de chaque seuil était mesurée trois fois. La moyenne des seuils la plus basse déterminait l'œil dominant à ce test.

I.3.1.2.8.3. Procédure

Une fois le participant installé dans le stéréoscope et la vérification que les lignes de nonius et le point central étaient bien fusionnés, il devait par l'appui d'une touche, lancer la première stimulation.

I.3.1.3. Procédure expérimentale

Tous les participants ont réalisé les huit tests de dominance oculaire dans l'ordre suivant : acuité vision de loin, acuité vision de près, test du point proche de convergence (PPC), une première répétition du test de rivalité de forme, le test de Worth, le test de sensibilité au flou, le test de la carte à trou, une seconde répétition du test de rivalité de forme, le test de sensibilité au mouvement et la dernière répétition du test de rivalité de forme.

I.3.1.4. Traitement de données

Cinq des huit tests de dominance oculaire (acuité vision de près, acuité vision de loin, carte à trou, PPC et le test de Worth) ont été caractérisés qualitativement. Ainsi, +1 indiquait que l'œil droit (OD) était dominant, -1 indiquait une dominance de l'œil gauche (OG), et 0 était enregistré lorsqu'aucune dominance ne pouvait être identifiée (Coren et Kaplan, 1973). Les autres tests fournissaient des données quantitatives. Dans les cas où l'œil dominant était celui qui avait le score le plus élevé (sensibilité au flou et rivalité de forme), la force de la dominance était déterminée par le calcul ci-dessous :

$$\frac{\text{score OD} - \text{score OG}}{\text{score OD} + \text{score OG}}$$

Pour le test de sensibilité au mouvement, l'œil dominant étant déterminé comme celui ayant le score le plus bas, la force de la dominance était déterminée par le calcul ci-dessous :

$$\frac{\text{score OG} - \text{score OD}}{\text{score OG} + \text{score OD}}$$

Ces données quantitatives ont également été converties en données qualitatives en fonction du signe du résultat comme pour les résultats qualitatifs (un score positif indiquait une dominance de l'œil droit (+1), un score négatif indiquait une dominance de l'œil gauche (-1), et un score de zéro restait inchangé). Comme il n'a pas été possible d'enregistrer une absence de dominance (score de zéro) pour certains tests (*i.e.* carte à trou, sensibilité au mouvement et rivalité de forme), les données ont été homogénéisées en calculant des Z scores pour tous les tests.

I.3.1.5. Analyses statistiques

Ces Z scores ont ensuite été comparés deux à deux en utilisant un test de corrélation de Kendall (Coren et Kaplan, 1973 ; Li et al., 2010) (Tableau 11). Ensuite, comme Coren et Kaplan (1973), une analyse factorielle a été réalisée pour déterminer si les tests pouvaient être regroupés autour d'un facteur commun (Tableau 12). Le seuil de signification a été fixé à 0,5 (Coren et Kaplan, 1973).

I.3.2. Résultats

La comparaison des tests de dominance oculaire deux à deux a révélé une corrélation significative entre plusieurs tests et le test de la carte à trou (Tableau 11). Plus précisément, le test de la carte à trou a été corrélé avec le PPC, le test d'acuité vision de près, et le test de sensibilité au mouvement.

Tableau 11 : Matrice de corrélation des huit tests de dominance oculaire

Significativité à $p < 0,05$

Tests de dominance	1	2	3	4	5	6	7	8
1. Carte a trou	-	0,44*	-0,15	0,50*	0,23	-0,03	0,47*	0,12
2. PPC		-	-0,20	0,32	-0,10	-0,24	0,34	-0,05
3. Acuité vision de loin			-	0,04	-0,07	0,40*	0,19	-0,28
4. Acuité vision de près				-	0,30	-0,05	0,13	0,13
5. Worth					-	0,21	-0,10	0,32
6. Sensibilité au flou						-	0,14	0,24
7. Sensibilité au mouvement							-	0,09
8. Rivalité de forme								-

L'analyse factorielle a confirmé le regroupement de ces quatre tests en identifiant un facteur commun (Tableau 12). Par conséquent, en raison de leur lien avec le test de la carte à trou (le test moteur par excellence), tous ont été considérés comme caractérisant la domination motrice pour les analyses suivantes.

La matrice de corrélation a révélé également que l'acuité vision de loin et le test de sensibilité au flou étaient significativement corrélés (Tableau 11).

Cependant, l'analyse factorielle identifie un facteur commun entre le test de sensibilité au flou, le test de Worth et le test de rivalité de forme, mais pas avec le test d'acuité vision de loin, qui lui partage un facteur commun avec le test de sensibilité au mouvement (Tableau 12).

Tableau 12 : Analyse factorielle des huit tests de dominance oculaire

Facteur impliqué quand le seuil est supérieur à 0,5 et inférieur à -0,5.

Tests de dominance	Facteur I	Facteur II	Facteur III
Carte à trou	-0,86	-0,01	0,08
PPC	-0,67	0,46	0,14
Acuité vision de loin	0,21	-0,38	0,77
Acuité vision de près	-0,70	-0,13	-0,03
Worth	-0,31	-0,61	-0,43
Sensibilité au flou	0,08	-0,80	0,32
Sensibilité au mouvement	-0,55	-0,04	0,58
Rivalité de forme	-0,29	-0,50	-0,48
Variance expliquée	2,20	1,63	1,47
Proportion totale	27,5 %	20,4 %	18,3 %

I.3.3. Discussion

L'objectif de cette étude était de déterminer si les tests de dominance oculaire sont interchangeables afin qu'un seul test puisse être utilisé dans le cadre d'une évaluation de la dominance oculaire dans l'utilisation des systèmes de réalité augmentée monoculaires. Nous avons donc évalué la corrélation entre différents tests de dominance.

Les résultats de la matrice de corrélation ont montré que les tests habituellement appelés tests de dominance oculaire motrice (le test de la carte à trou et le PPC) sont corrélés avec le test d'acuité vision de près et le test de sensibilité au mouvement. Ces résultats sont conformes à la littérature qui regroupe également ces tests en tant que tests de dominance oculaire motrice (Coren et Kaplan, 1973 ; Gronwall et Sampson, 1971 ; Li et al., 2010 ; Pointer, 2012 ; Seijas et al., 2007). Ces quatre tests sont donc considérés comme interchangeables.

Les études qui évaluent l'impact de l'œil de présentation sur la performance et le confort subjectif utilisent généralement le test de la carte à trou (Browne, Winterbottom, et Patterson, 2010 ; Cupero et al., 2009 ; Hershberger et Guerin, 1975) ou un test qui lui ressemble lorsque le premier manque de précision (Browne, Winterbottom, et Patterson, 2010) pour mesurer la dominance oculaire motrice. Par conséquent, il a été choisi de prendre en compte uniquement ce test pour caractériser la dominance motrice dans l'évaluation des performances et du confort (I.2.2). L'analyse factorielle corrobore avec ce résultat puisqu'il est trouvé un facteur commun à ces quatre tests. Un deuxième facteur est également trouvé réunissant le test de Worth, le test de sensibilité au flou et le test de rivalité de forme. Ces trois tests sont définis dans la littérature comme mesurant la dominance oculaire sensorielle. Cependant, notre étude ne révèle pas de corrélation entre eux ce qui confirme, comme l'ont fait plusieurs auteurs (Cohen, 1952 ; Coren et Kaplan, 1973 ; Li et al., 2010), qu'ils ne sont pas

interchangeables et qu'ils semblent évaluer différentes composantes de la dominance oculaire sensorielle. Le test de Worth détermine l'œil dominant lorsque la couleur est en rivalité binoculaire ; le test de sensibilité au flou lorsque c'est la netteté de chaque image qui est en rivalité binoculaire et le test de rivalité de forme quand il s'agit du contenu de l'image.

I.4. Conclusion de l'ensemble de l'étude

Nos résultats démontrent que la rivalité binoculaire, lorsqu'elle est sollicitée par un système de réalité augmentée monoculaire, affecte les performances de manière différente selon les caractéristiques de la scène binoculaire vue à travers le casque. Nos résultats suggèrent qu'il est possible de déterminer une configuration d'affichage qui limite l'impact de la rivalité binoculaire. Il semble donc important que l'image virtuelle affichée dans le visuel de casque monoculaire puisse être configurée ou adaptée aux conditions environnementales. L'utilisation d'une symbologie pulsée semble être une piste, afin de limiter les effets de la rivalité binoculaire lors de l'utilisation de dispositifs de réalité augmentée monoculaires transparents. Cependant, ces résultats préliminaires doivent être confrontés à des scènes plus écologiques pour déterminer précisément quand et comment ajuster la configuration de l'affichage.

Cette étude souligne également que la dominance oculaire est un concept difficile à appréhender. Alors que la dominance motrice semble être assez facile à évaluer, ce n'est pas le cas pour les tests sensoriels, qui semblent très dépendants de la composante sensorielle qui est évaluée. Le peu de participants ayant un effet de l'œil de présentation n'a pas permis d'évaluer pleinement si la dominance oculaire permet de déterminer l'œil de présentation de l'information monoculaire. Cependant sur les participants qui présentent un effet de l'œil, le test de sensibilité au flou est celui qui prédit le mieux l'œil avec lequel ils étaient meilleurs.

II. Evaluation de différents profils de pulsation

II.1. Introduction	106
II.2. Méthode	108
II.2.1. Participants	108
II.2.2. Matériel.....	109
II.2.3. Stimuli	109
II.2.4. Tâche	114
II.2.5. Procédure.....	114
II.2.6. Recueil des données	115
II.2.7. Analyse statistique	115
II.3. Résultats	115
II.3.1. Effet de l'entraînement.....	116
II.3.2. Effet de la modification du fond binoculaire et de la cible par rapport à l'étude I (conditions contrôles)	116
II.3.3. Effet des caractéristiques des stimulations pour les 24 conditions.....	117
II.3.3.1. Sur la performance de suivi de cible.....	117
II.3.3.2. Sur le nombre d'erreurs d'identification des évènements.....	118
II.3.3.3. Sur le temps de détection.....	118
II.3.3.4. Sur la perte d'information	120
II.3.3.5. Sur le confort visuel	120
II.4. Discussion	120
II.4.1. Impact des modifications méthodologiques.....	120
II.4.2. Effet d'un conflit interoculaire de type réalité augmentée monoculaire sur la perception et le confort.....	121
II.4.3. Influence des caractéristiques du fond binoculaire.....	121
II.4.4. Influence des caractéristiques d'affichage.....	122

II.1. Introduction

L'état de l'art montre que la rivalité binoculaire se manifeste différemment selon les images dichoptiques présentées aux deux yeux. Il montre également, couplé aux résultats de l'étude précédente que les caractéristiques de l'image monoculaire et/ou de l'environnement binoculaire, perçus dans un équipement de réalité augmentée monoculaire, vont affecter différemment les performances. Les conditions environnementales auxquelles sont soumis les pilotes ne sont pas sous leur contrôle. Seules les informations monoculaires vont pouvoir être ajustées en fonction de ces contraintes.

La symbologie monoculaire utilisée dans l'étude précédente s'inspire en partie des symboles conformes et notamment du vecteur vitesse (*flight path vector* ou FPV). L'attention exogène que nous avons matérialisée par une pulsation de cette symbologie monoculaire semble être une piste pour réduire les contraintes provoquées par la rivalité binoculaire. En effet, cette variation de contraste modifie la force du stimulus (Brascamp, Klink, et Levelt, 2015 ; Levelt, 1965). Ainsi, l'augmentation de la différence de force entre les deux stimuli, augmentera la durée moyenne de dominance (*i.e.* prédominance) du stimulus le plus fort. L'utilisation d'une symbologie monoculaire soumise à pulsation et donc modifiant son contraste apparent fera varier cette différence de force avec le fond binoculaire. On suppose alors que cela a un impact sur la dominance du stimulus au cours du temps. Augmenter le contraste de la symbologie monoculaire favoriserait sa dominance sur le fond et la faire diminuer favoriserait la dominance du fond binoculaire par rapport à la symbologie monoculaire.

Néanmoins, il semble que selon les caractéristiques du fond binoculaire et le contraste de la symbologie monoculaire, la pulsation est plus ou moins efficace pour améliorer les performances. Les résultats de la précédente étude révèlent qu'il faut afficher une symbologie monoculaire soumise à pulsation et à faible contraste pour détecter plus rapidement des événements (I.2.2.4.3.2). Toutefois, il persiste des situations pour lesquelles elle ne l'est pas. C'est le cas notamment en BF-60 % où le temps de fixation est allongé avec la pulsation (Figure 52) mais aussi plus globalement pour le suivi de cible où les résultats sont meilleurs sans pulsation (Figure 49). On suppose que ces perturbations sont imputables au profil de pulsation choisi empiriquement. Ainsi, il est proposé d'évaluer l'intérêt du doublement de l'épaisseur de la symbologie et de déterminer si une évolution plus progressive des variations de luminance lors de la pulsation peut être bénéfique.

Bien que nos résultats soient encourageants concernant la symbologie pulsée, il s'avère que lorsque la pulsation était projetée à fort contraste (luminance moyenne proche de celle de la cible), cela entraînait une disparition brève expliquant potentiellement la dégradation des performances dans cette configuration. Ainsi, il est proposé de limiter le déclin de la luminance au-dessus de celle de la cible de sorte que la symbologie ne disparaisse jamais.

La variation de contraste ou profil de pulsation à laquelle le FPV de la symbologie est soumis doit se distinguer des différentes alertes ou informations clignotantes pouvant être visibles en vol à la fois dans la symbologie et dans l'environnement. C'est le cas par exemple de certaines alarmes projetées dans la symbologie ou des lumières stroboscopiques blanches anticollision placées sur les deux ailes et à l'arrière des aéronefs.

Afin de déterminer l'influence de l'information monoculaire sur la perception de la scène en situation de rivalité binoculaire, il sera comparé la performance de suivi de cible, le nombre d'erreurs d'identification, d'évènements et le temps de détection en fonction de différents profils de pulsation de la symbologie monoculaire. Les variables associées à l'utilisation de l'oculomètre ne sont pas mesurées dans la présente étude car les analyses préliminaires des données de l'étude précédente n'avaient pas donné de résultats probants. Les résultats de l'étude précédente révèlent un impact différent de la symbologie pulsée selon les conditions d'affichage. Les différents profils de pulsation seront donc testés selon trois caractéristiques du fond binoculaire et selon deux contrastes de la symbologie monoculaire.

Alors que la méthode de cette étude se rapproche de ce qui a été proposé dans l'étude précédente, certains paramètres n'ont cependant pas été pris en compte. En effet, étant donné le peu d'effet de l'œil de présentation sur les performances, nous avons choisi arbitrairement de présenter la symbologie monoculaire uniquement sur l'œil droit.

De plus, les tests optométriques précédemment réalisés n'ayant pas non plus identifiés de modification des capacités de fusion motrice avant et après nos mesures. Ils n'ont donc pas fait partie de la procédure de cette étude.

Le questionnaire de l'étude précédente relevait uniquement le confort des participants avant et après chaque condition. Il évaluait la fatigue visuelle et ses différents symptômes (maux de tête, vision double, vision floue et tiraillements oculaires). Néanmoins, il a également permis de relever des commentaires quant à la perception induite par la stimulation. Il s'avère que certains participants ont mentionné « l'impression que le fond passait devant la cible ». Étant donné que la cible faisait partie intégrante du fond, il était difficile de concevoir une telle perception. Il s'avère que cette impression n'est pas anodine puisque c'est le fond binoculaire composé de réseaux sinusoidaux qui provoque ce type d'illusion appelée illusion du papier peint. Si l'on converge régulièrement sur un motif répétitif, le motif semble se déplacer en profondeur vers un plan plus proche que le plan de convergence (McKee et al., 2007). En effet, ce phénomène s'explique par la « règle du plus proche voisin » (Arditi, Kaufman, et Movshon, 1981). Tout motif répétitif contient de nombreuses alternatives d'appariement et le système stéréoscopique sélectionne les correspondances au niveau ou à proximité du plan de fixation parce que ces correspondances sont plus fortement pondérées que les correspondances éloignées du plan de fixation (Figure 59). Cependant, ce déplacement n'est pas instantané (Goutcher et Mamassian, 2005), c'est pourquoi tous les participants ne l'ont pas expérimenté et pour ceux

l'ayant perçu, le phénomène ne se produisait pas à chaque condition. Ce changement de perception n'est pas sous le contrôle de l'expérimentateur et peut être un distracteur quant à la tâche du participant.

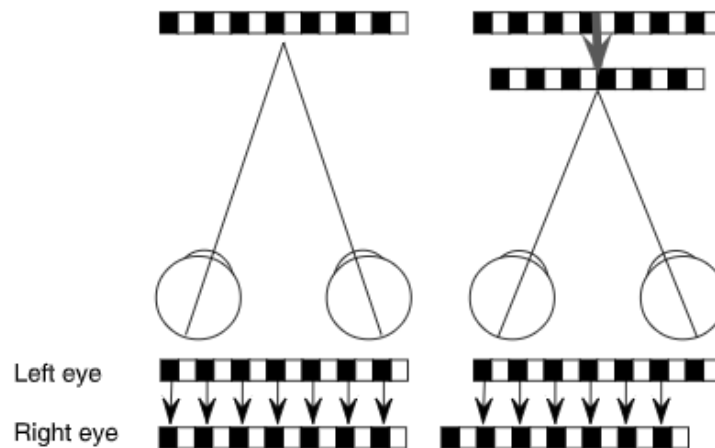


Figure 59 : Illusion du papier peint

La fixation d'un réseau répétitif (ici un réseau sinusoïdal) peut conduire à un nouvel appariement du système stéréoscopique impliquant une perception du motif en avant du plan de fixation (McKee et al., 2007).

Dans cette deuxième étude, nous avons donc modifié l'apparence du fond. Plutôt que des réseaux sinusoïdaux à deux dimensions, nous avons utilisés un bruit blanc également dépourvu de tout contenu sémantique et caractérisé en termes de contraste et de fréquences spatiales.

Peu de pertes d'information ont été rapportées par les participants lors de l'étude précédente (appui pour le signaler pendant la condition ou questionnaire entre chaque condition). De plus, un score de 98,8 % de bonnes réponses à l'identification a été relevé. Notre hypothèse concernant ces résultats est que le rapport cible/symbologie monoculaire était trop grand ce qui rendait la tâche plus simple que si la cible avait été plus petite. Le participant pouvait suivre la cible sans nécessairement regarder le fond binoculaire lui permettant de facilement identifier les événements. La taille de la cible a donc été réduite pour augmenter la proportion de fond binoculaire visible par le participant.

II.2. Méthode

II.2.1. Participants

Onze participants ont pris part à cette étude : quatre femmes et sept hommes âgés de 24 à 59 ans (moyenne $36,91 \pm 10,57$ ans). Les critères d'inclusion étaient les mêmes que pour l'étude précédente (I.2.1.1).

L'étude a été menée conformément à la Déclaration d'Helsinki et a satisfait aux exigences légales locales (N IDRCB : 2018-A01331-54).

II.2.2. Matériel

Le matériel employé pour cette étude est le même que celui de l'étude précédente (I.2.1.2) à l'exception de l'oculomètre qui n'a pas été utilisé.

II.2.3. Stimuli

La génération des stimuli s'est, comme pour l'étude précédente, faite via la Psychophysics Toolbox du logiciel Matlab (The MathWork, Natick, MA, USA). La luminance moyenne de l'écran était de 13 cd/m², la luminance maximale de 26 cd/m² et la luminance minimale de 0 cd/m².

Les performances et le confort visuel ont été évalués selon trois fonds binoculaires : en hautes fréquences spatiales à 100 % de contraste, en basses fréquences spatiales à 100 % ou 25 % de contraste. Cette augmentation du contraste de 25 % par rapport au contraste de 20 %, utilisé dans l'étude précédente, est dû au fait qu'à seulement 20 %, la cible n'était plus assez visible pour réaliser la tâche de suivi. L'augmentation à 25 % a permis d'améliorer la visibilité tout en conservant une condition de fond binoculaire avec un contraste faible.

D'une taille de 2,1° dans l'étude précédente, la cible a été réduite pour atteindre 1,75° dans cette étude.

Il a également été évalué les performances et le confort avec une symbologie monoculaire pouvant avoir deux contrastes. Un contraste de 1 ($L_{max} = 26 \text{ cd/m}^2$ et $L_{min} = 0 \text{ cd/m}^2$) et un contraste de 0,6 ($L_{max} = 15,6 \text{ cd/m}^2$ et $L_{min} = 10,4 \text{ cd/m}^2$).

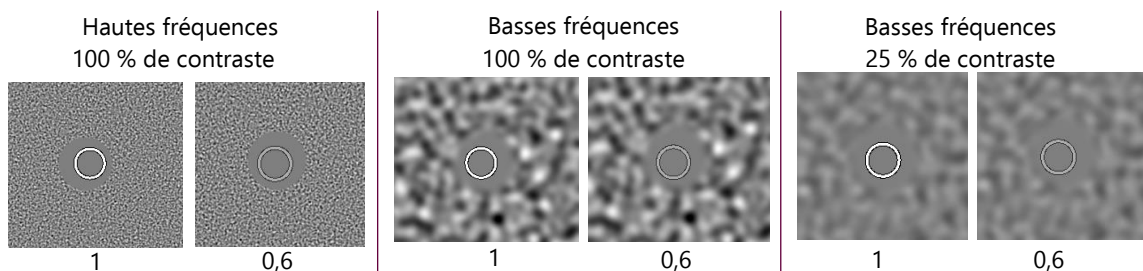


Figure 60 : Conditions d'affichage du fond binoculaire et de la symbologie monoculaire

La symbologie monoculaire, qui peut avoir deux niveaux de contraste (1 ou 0,6), est présentée sur un fond binoculaire qui peut avoir deux niveaux de fréquences spatiales (haut ou bas) et deux niveaux de contraste différents (100 %, ou 25 %).

Pour contrôler un éventuel effet du changement du fond, il a tout d'abord été comparé les résultats aux conditions BF-100 % avec un fond en réseaux sinusoidaux versus un fond généré avec du bruit blanc (Figure 61). La symbologie monoculaire avait un contraste de 0,6 et il a été testé une condition sans pulsation (Figure 61). Pour contrôler ensuite un éventuel effet du changement de la taille de la cible, il a été comparé les résultats entre une cible de 2,1° et 1,75° sur un fond en BF-100% généré avec du bruit blanc (Figure 61).

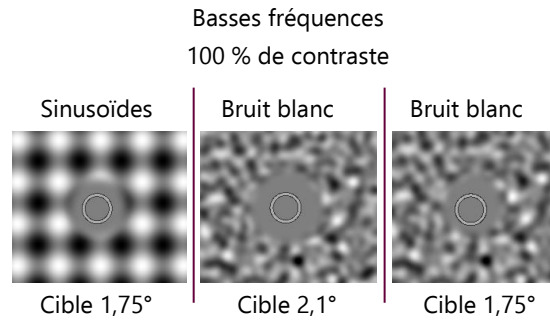


Figure 61 : Conditions contrôle du fond binoculaire et de la cible monoculaire

La condition contrôle de gauche présente le même fond que l'étude I (*i.e.* un réseau sinusoïdale), dans lequel est affiché une cible de 1,75°. La condition contrôle du milieu présente le fond binoculaire généré via un bruit blanc avec la cible utilisée dans l'étude I de 2,1°. La condition de droite présente le fond binoculaire généré avec un bruit blanc et une cible de 1,75°. Dans ces trois cas, le fond est en basses fréquences spatiales à 100 % de contraste.

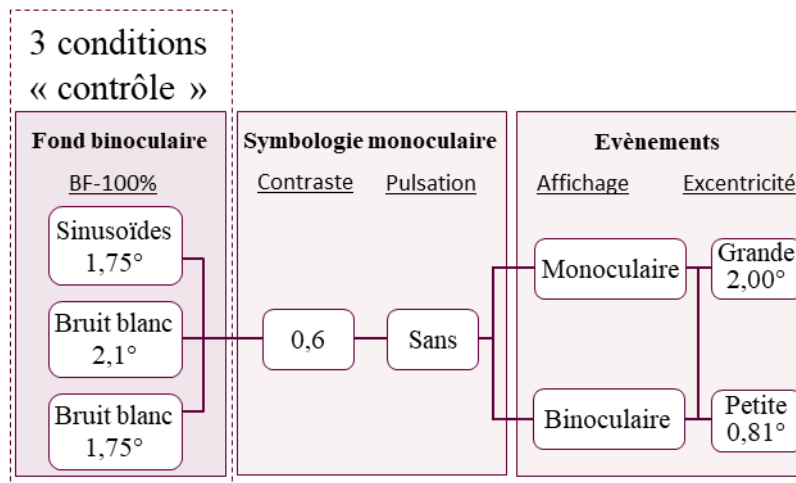


Figure 62 : Conditions d'affichage dites « contrôle » du fond binoculaire et de la symbologie monoculaire

Dans chaque condition étaient présentés des évènements pouvant être affichés sur un œil ou sur les deux yeux et à deux excentricités différentes.

L'objectif principal de cette étude est de tester plusieurs profils de pulsation et de consolider nos résultats précédents à savoir que, dans certaines conditions, la pulsation permet d'améliorer les performances par rapport à une condition sans pulsation. Le profil utilisé dans la première étude était caractérisé par la diminution progressive du contraste (500 ms), puis restait constant pendant 30 ms. Il augmentait ensuite brièvement pendant 50 ms jusqu'à atteindre à nouveau un contraste de 1. L'épaisseur de l'anneau après cette phase de remontée était doublée pendant 60ms puis revenait à sa taille d'origine sans changement de contraste pendant 1360 ms. La durée totale de 2000 ms se répétait en continue (Figure 42).

Afin de que la symbologie ne disparaisse jamais pendant la phase de pulsation, il a été choisi de limiter le déclin de la luminance de la symbologie. Ainsi, à un contraste maximal

de 1, la pulsation ne descend pas en dessous de 0,7, soit un déclin de 0,3 (Figure 63). La même variation de contraste a été utilisée pour le contraste maximal à 0,6, oscillant ainsi de 0,6 à 0,3 (Figure 63).

Afin de rendre compte d'un effet de l'épaisseur de la symbologie monoculaire, il a été testé un profil avec (Figure 63) et sans (Figure 64) dédoublement de l'épaisseur.

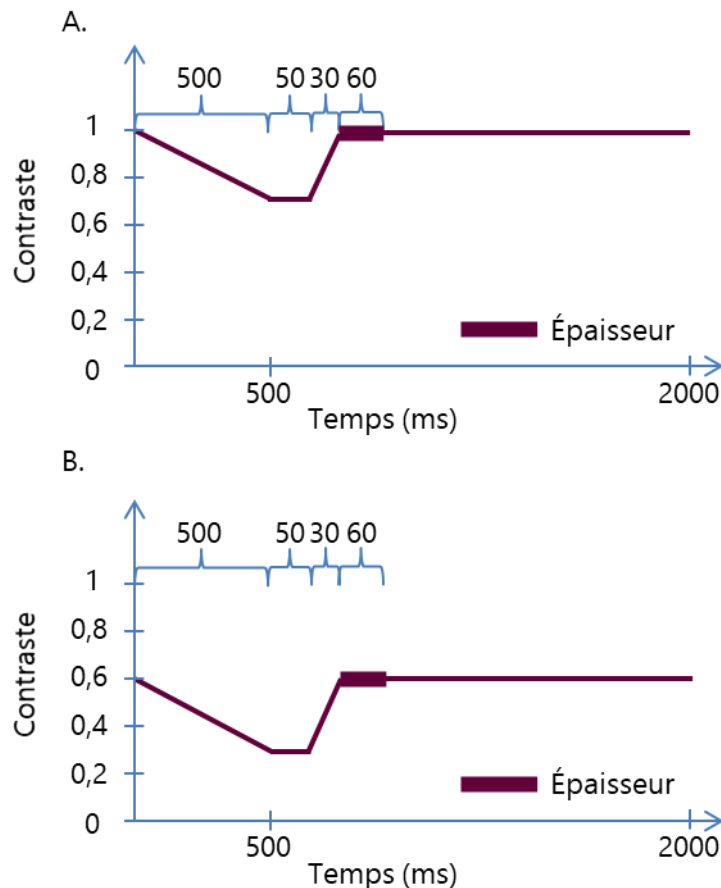


Figure 63 : Profil 1 de la pulsation présenté avec un contraste de maximal de 1 (A) et maximal de 0,6 (B)

Ce profil reprend les paramètres des phases utilisés dans le profil de pulsation de la précédente étude. Cependant, alors qu'il baissait progressivement de 50 %, ici, il diminue seulement de 30 % pendant la phase de descente d'une durée de 500 ms. Il reste constant pendant 50 ms puis est augmenté progressivement pendant 30 ms. L'épaisseur de l'anneau est doublé pendant 60 ms puis revient à sa taille initiale. La période d'une pulsation est de 2000 ms. A contraste maximal de 1, le contraste passe donc de 1 à 0,7 dans la première phase. A contraste maximal de 0,6, le contraste diminue jusqu'à 0,3.

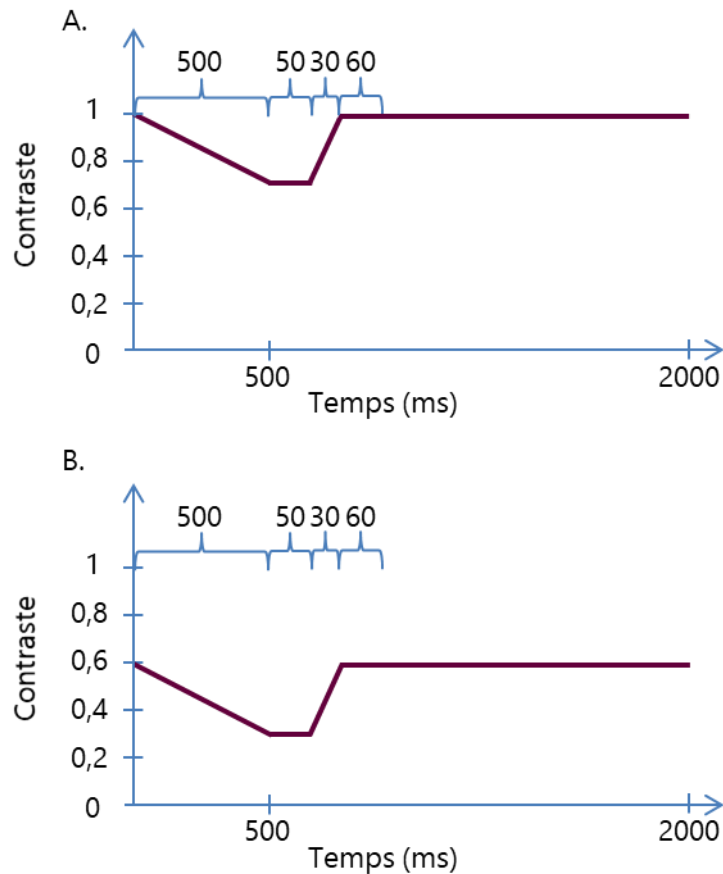


Figure 64 : Profil 2 de la pulsation présenté avec un contraste maximal de 1 (A) et 0,6 (B)

Le profil 2 reprend les mêmes caractéristiques que le profil 1 (Figure 63) excepté que l'anneau ne double pas d'épaisseur.

Il a également été testé un profil dont chaque phase du profil utilisé précédemment a été doublée tout en conservant une période de 2000 ms (Figure 65). Le contraste diminuait pendant 1000 ms puis restait constant pendant 60ms. Il augmentait ensuite pendant 100 ms jusqu'à atteindre à nouveau son contraste maximal. L'épaisseur de l'anneau après cette phase de remontée était doublée pendant 120 ms puis revenait à sa taille d'origine sans changement de contraste pendant 720 ms. La durée totale de 2000 ms était la même que le profil de l'étude I et se répétait jusqu'à la fin de l'essai.

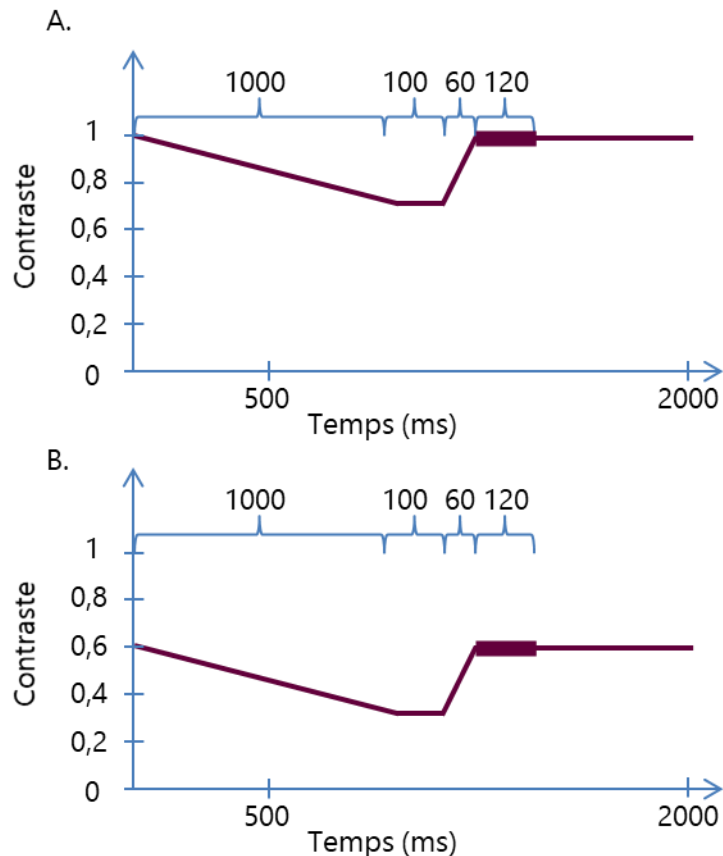


Figure 65 : Profil 3 de la pulsation présenté avec un contraste maximal de 1 (A) et maximal de 0,6 (B)

Le profil 3 a été construit de sorte que chaque phase du profil 1 (Figure 63) dure deux fois plus longtemps tout en conservant une période de pulsation de 2000 ms. Ainsi, le contraste diminue pendant 1000 ms puis reste à valeur minimum pendant 100 ms. Il est augmenté jusqu'à atteindre le contraste maximum pendant 60 ms puis l'épaisseur est doublée pendant 120 ms.

Avec le profil sans pulsation, trois profils de la symbologie monoculaire ont été évalués selon deux contrastes.

Les événements affichés sont des anneaux de Landolt dont les caractéristiques d'affichage sont les mêmes que l'étude précédente (Figure 44).

Les performances ont été évaluées selon 24 conditions :

- 3 conditions de fond dont une avec un fond en hautes fréquences spatiales à 100 % de contraste et deux avec un fond en basses fréquences spatiales pouvant avoir 100 %, ou 25 % de contraste
- x 2 contrastes de la symbologie monoculaire
- x 4 profils de pulsation (Figure 66).

Etant donné que l'étude précédente n'avait pas démontré d'effet de l'œil de présentation, il a été choisi de placer l'image monoculaire uniquement sur l'œil droit des participants. S'ajoutent à ces conditions, les quatre conditions « contrôle » (Figure 62).

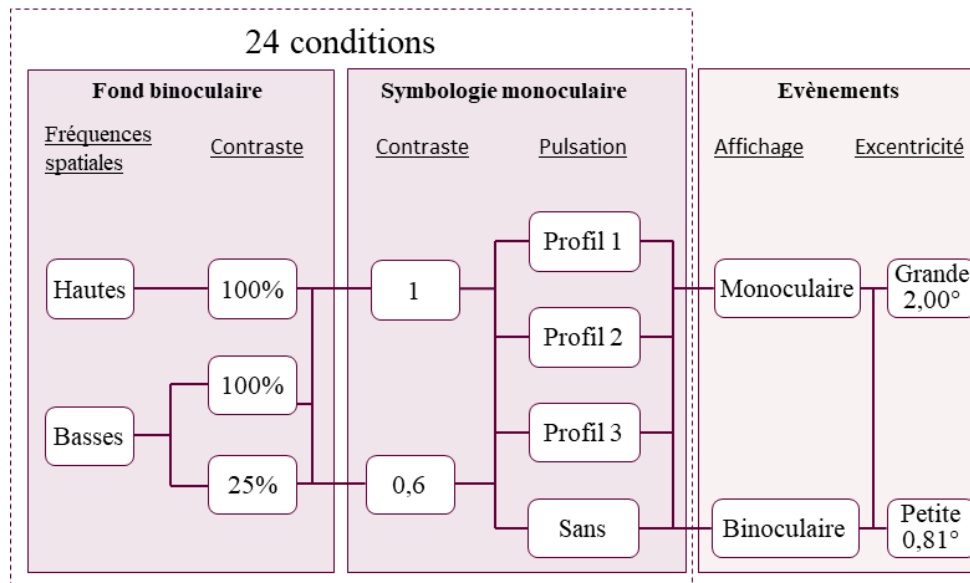


Figure 66 : Conditions d'affichage du fond binoculaire et de la symbologie monoculaire

La symbologie monoculaire peut avoir deux contrastes (1 et 0,6), être sans pulsation ou selon un des trois types de pulsation et est présentée sur un fond binoculaire qui peut avoir deux niveaux de fréquences spatiales (haut ou bas) et deux niveaux de contraste différents (100 % ou 25 %). Dans chaque condition étaient présentés des évènements pouvant être affichés sur un œil ou sur les deux yeux et à deux excentricités différentes.

II.2.4. Tâche

Les tâches que devaient effectuer le participant étaient identiques à celles de l'expérimentation précédente (I.2.1.4).

II.2.5. Procédure

Une fois que les instructions avaient été données au participant, que son consentement avait été signé et que les critères d'inclusion avaient été vérifiés, le participant était invité à se placer assis devant l'écran et à positionner sa tête sur la mentonnière afin de la maintenir stable pendant chaque condition. Etant donné le grand nombre de conditions (28 au total), le passage de chaque participant était divisé en deux sessions. La première session comprenait une séquence aléatoire de quatorze conditions précédés d'un essai de familiarisation. La deuxième session était composée d'un essai de familiarisation puis des quatorze conditions restantes.

Comme pour les expérimentations précédentes, à la fin de chaque condition, le ressenti du participant vis-à-vis de la contrainte visuelle imposée par la condition effectuée a été évalué via le même questionnaire qu'à l'étude précédente (Annexe 2). Il devait donner un score de 0 à 5 (0 étant aucune gêne, 5 une gêne très intense) sur l'évaluation de sa fatigue visuelle générale et des symptômes ressentis (maux de tête, vision double, vision floue et tiraillements oculaires). Il pouvait également confirmer oralement ou non la perte visuelle d'une information (fond binoculaire ou symbologie monoculaire).

II.2.6. Recueil des données

Les variables « performance de suivi », « nombre d'erreurs d'identification », « temps de détection », « perte d'information » et le confort visuel ont été traités comme dans l'étude précédente (I.2.1.6).

II.2.7. Analyse statistique

L'échantillon de participants étant faible, il n'a pas été possible de faire l'ANOVA sur le facteur session, comme précédemment. Ainsi, pour évaluer si un effet d'entraînement était perçu lors de la deuxième session, un test exact de Fisher a été réalisé entre les performances des essais réalisés à la première session et ceux de la deuxième session sur les variables dépendantes (*i.e.* performance de suivi de cible et temps de détection).

Afin d'évaluer s'il y avait un effet du changement de fond (réseaux sinusoïdaux ou bruit blanc) et de la cible (2,1° ou 1,75°), une ANOVA à mesures répétées pour chaque variable dépendante a été réalisée. Ainsi pour les conditions contrôle, le facteur évalué pour les différentes variables « performance de suivi » et « temps de détection » implique les caractéristiques du fond et taille de la cible. Pour la variable identification des événements, le nombre d'erreurs est si faible qu'il n'a pas été possible de réaliser une analyse statistique. Le nombre de perte n'est également pas assez conséquent pour être analysé dans ces conditions contrôle, tout comme le confort visuel qui ne s'est pas dégradé puisque les participants n'ont jamais ressenti de fatigue visuelle et de symptômes.

Une ANOVA à mesures répétées sur la performance de suivi de cible a été réalisée impliquant les facteurs des caractéristiques du fond (*i.e.* fréquences spatiales et contraste du fond binoculaire) et des caractéristiques de la symbologie monoculaire (*i.e.* luminance et pulsations).

Il a également été réalisé une ANOVA à mesures répétées sur les temps de détection considérant les facteurs des caractéristiques du fond, de l'affichage de la symbologie monoculaire et des événements (monoculaire/binoculaire et excentricité).

Le score d'identification atteignant 98,15 % de bonnes réponses pour l'ensemble des participants, il n'a pas non plus fait l'objet d'une analyse statistique.

La perte d'information signalée via le questionnaire ou par l'appui sur une gâchette ainsi que le confort visuel n'ont pas mené à une analyse statistique étant donné le faible échantillon quant à ces résultats.

II.3. Résultats

Il sera présenté dans un premier temps les résultats concernant l'effet d'entraînement comme pour l'étude précédente puisque les essais se sont répartis sur deux sessions sur deux jours différents (II.3.1). Puis, l'effet de la modification du fond binoculaire et de la cible seront

présentés (II.3.2). Enfin, les résultats évaluant les performances selon les caractéristiques des stimulations seront détaillés (II.3.3).

II.3.1. Effet de l'entraînement

Les participants ayant réalisé deux sessions sur deux jours différents, il s'agissait dans un premier temps d'évaluer la présence ou non d'un effet d'entraînement d'une session à l'autre. Selon les résultats du test exact de Fisher, aucune différence significative a été constatée entre la première et la deuxième session sur la variable performance de suivi ($F(1,10) = 4,98$; $p = 0,384$) et sur les temps de détection des événements ($F(1,10) = 0,03$; $p = 0,14$).

II.3.2. Effet de la modification du fond binoculaire et de la cible par rapport à l'étude I (conditions contrôles)

L'ANOVA à mesures répétées pour la variable performance de suivi impliquant les différentes conditions contrôles a révélé un effet des caractéristiques du fond ($F(2,20) = 7,27$; $p < 0,001$). L'analyse post-hoc révèle un effet de la diminution de la taille de la cible. La performance était significativement meilleure ($p < 0,01$) dans la condition de fond binoculaire en bruit blanc avec la cible de taille $2,1^\circ$ ($13,35 \pm 5,66'$) par rapport à la même condition avec la cible de $1,75^\circ$ ($15,50 \pm 6,60'$) (Figure 67). Il n'y a cependant pas d'effet quant au changement de fond binoculaire puisqu'aucune différence significative ($p = 0,74$) n'est trouvée entre les performances réalisées avec le fond binoculaire en réseaux sinusoïdaux ($15,74 \pm 6,01'$) et celui en bruit blanc ($15,50 \pm 6,60'$).

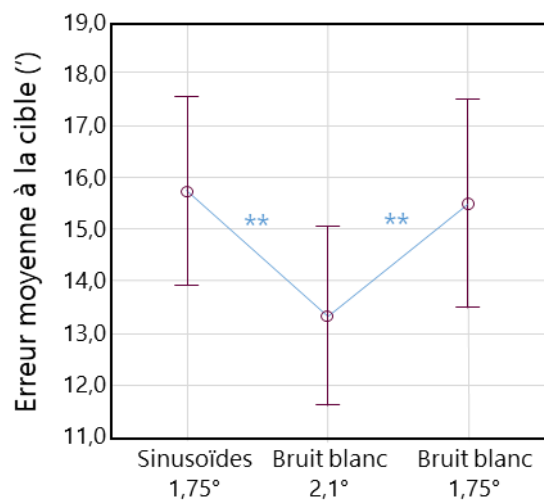


Figure 67 : Performance de suivi (erreur moyenne en minutes d'arc) en fonction des conditions contrôle

L'ANOVA à mesures répétées sur le temps de détection impliquant les différentes conditions contrôles n'a révélé aucun effet des caractéristiques du fond ($F(2,20) = 1,21$, $p = 0,32$).

Le score d'identification atteignant 97,92 % de bonnes réponses (11 erreurs sur 528 évènements présentés) pour l'ensemble des participants, il n'a pas été fait d'analyse statistique.

Seuls trois participants ont expérimenté une perte d'information sur trois conditions différentes par l'appui sur une gâchette et l'ont confirmé oralement. De plus, le confort visuel ne s'est pas dégradé en fonction des conditions contrôle, puisqu'au participant n'a expérimenté de fatigue visuelle ou de symptômes via le questionnaire.

II.3.3. Effet des caractéristiques des stimulations pour les 24 conditions

II.3.3.1. Sur la performance de suivi de cible

Une ANOVA à mesures répétées sur la performance de suivi, considérant les caractéristiques du fond binoculaire (*i.e.* fréquence spatiale et contraste) et les configurations de la symbologie monoculaire (*i.e.* contraste et pulsation) n'a pas révélé d'effet des caractéristiques du fond ($F(2,20) = 1,57$; $p = 0,23$). Cependant, un effet de la pulsation a été trouvé ($F(3,30) = 3,56$; $p = 0,026$). Une analyse post-hoc (Figure 68) révèle une dégradation des performances avec le profil 3 de la pulsation (Figure 65) ($16,43 \pm 1,92'$) par rapport au profil 1 (Figure 63) ($15,78 \pm 1,96'$), au profil 2 (Figure 64) ($15,71 \pm 1,89'$) et sans la pulsation ($15,51 \pm 1,83'$).

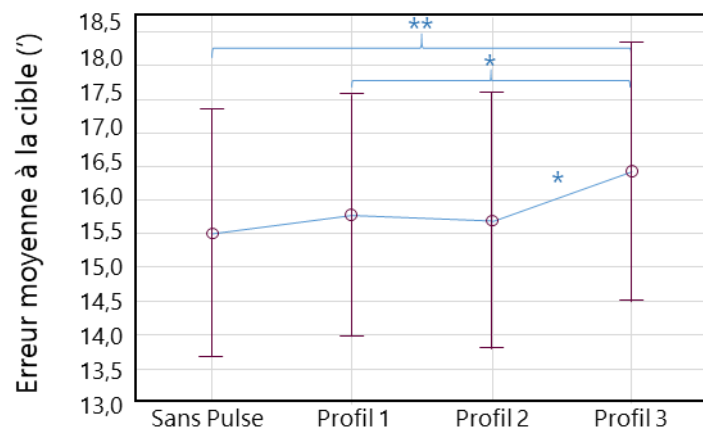


Figure 68 : Performance de suivi (erreur moyenne en minutes d'arc) en fonction de la pulsation de la symbologie monoculaire

Sont représentés les résultats sans pulsation, avec une pulsation suivant le profil 1 (Figure 63), le profil 2 (Figure 64) ou le profil 3 (Figure 65) quel que soit le contraste de la symbologie. Les barres verticales violettes représentent l'erreur standard. Une différence significative entre deux profils est représentée en bleu par une étoile ($p < 0,05$) ou deux étoiles ($p < 0,01$).

L'ANOVA révèle également un effet du contraste de la symbologie monoculaire ($F(1,10) = 8,87$, $p = 0,014$). Selon l'analyse post-hoc, les performances sont meilleures lorsque

la symbologie est affichée avec un contraste maximal de 1 ($15,42 \pm 1,76'$) qu'à contraste maximal de 0,6 ($16,30 \pm 1,94'$) (Figure 69).

On notera qu'il n'y a cependant pas d'interaction entre la pulsation et le contraste de la symbologie monoculaire.

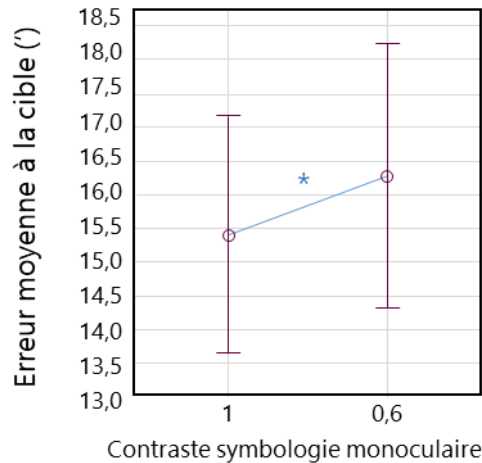


Figure 69 : Performance de suivi (erreur moyenne en minutes d'arc) en fonction du contraste de la symbologie monoculaire

Sont représentés les résultats avec une symbologie monoculaire de contraste 1 et 0,6. Les barres verticales violettes représentent l'erreur standard. Une différence significative entre deux conditions est représentée en bleu par une étoile ($p < 0,05$).

II.3.3.2. Sur le nombre d'erreurs d'identification des évènements

L'identification des évènements a donné un score atteignant 97,92 % de bonnes réponses (78 erreurs sur les 4224 évènements présentés dans l'ensemble des 24 conditions aux onze participants). Deux participants ont contribué à eux seuls à 62 erreurs. Cette variable n'a donc pas fait l'objet d'analyse statistique.

II.3.3.3. Sur le temps de détection

L'ANOVA à mesures répétées réalisée sur les temps de détection impliquant les caractéristiques du fond (*i.e.* fréquence spatiale et contraste), l'affichage de la symbologie monoculaire (*i.e.* contraste et pulsations) et des évènements (*i.e.* monoculaire ou binoculaire et excentricité) révèle un effet des caractéristiques du fond ($F(2,20) = 7,14$; $p < 0,01$). L'analyse post-hoc (Figure 70) indique qu'il n'y a pas d'effet des fréquences spatiales puisqu'il n'y a pas de différence significative ($p = 0,14$) entre les performances réalisées avec un fond en hautes fréquences ($793,56 \pm 56,85$ ms) et celles en basses fréquences spatiales ($812,92 \pm 58,54$ ms). Cependant, un effet du contraste du fond est révélé ($p < 0,01$) (Figure 70). Les performances en basses fréquences spatiales sont meilleures avec un fond à 25% ($766,11 \pm 51,15$ ms) de contraste qu'un fond à 100 % de contraste ($812,92 \pm 58,54$ ms).

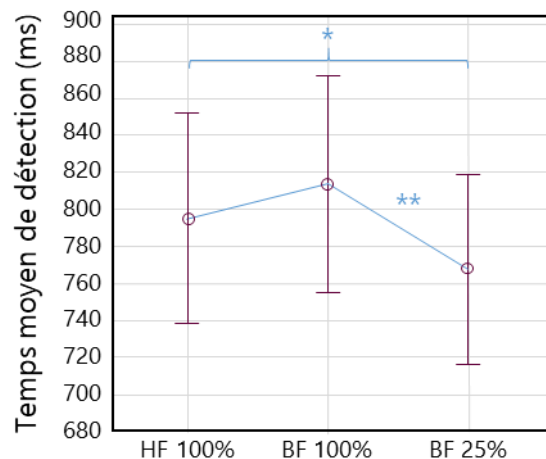


Figure 70 : Temps moyens de détection (ms) en fonction des caractéristiques du fond binoculaire

Sont représentés les résultats avec un fond binoculaire en hautes fréquences à 100 % de contraste, en basses fréquences à 100 % de contraste et 25 % de contraste. Les barres verticales violettes représentent l'erreur standard. Une différence significative entre deux conditions est représentée en bleu par une étoile ($p < 0,05$) ou par deux étoiles ($p < 0,01$).

Aucun effet du contraste de la symbologie monoculaire n'est révélé pour les temps de détection ($F(1,10) = 3,66$, $p = 0,08$).

L'ANOVA ne révèle également pas d'effet de la pulsation ($F(3,30) = 2,82$, $p = 0,06$) mais une tendance semble se dessiner en faveur du profil 2 (Figure 71).

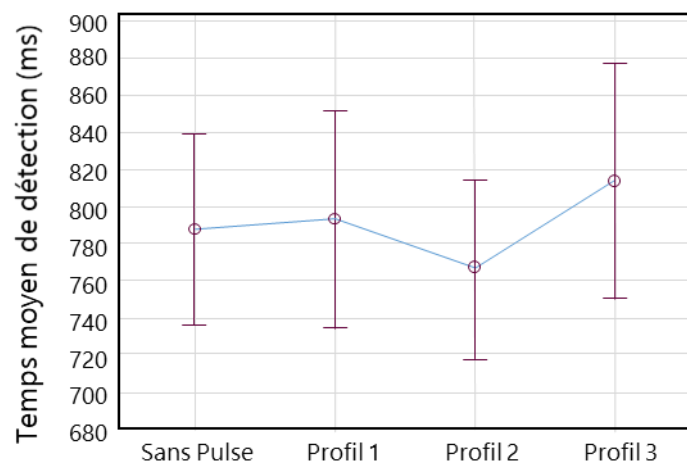


Figure 71 : Temps moyens de détection (ms) en fonction de la pulsation de la symbologie monoculaire

Sont représentés les résultats sans pulsation, avec une pulsation suivant le profil 1 (Figure 63), le profil 2 (Figure 64) et le profil 3 (Figure 65) quel que soit le contraste.

L'analyse statistiques révèle également que les temps de détection sont globalement plus courts pour les évènements affichés en petite excentricité ($749,82 \pm 52,29$ ms) que ceux affichés en grande excentricité ($832,31 \pm 58,37$ ms) ($F(1,10) = 66,67$; $p < 0,001$).

De même, l'analyse statistiques révèle que les temps de détection sont globalement plus courts pour les évènements affichés en binoculaire que ceux affichés en monoculaire ($F(1,10) = 38,75$; $p < 0,001$).

II.3.3.4. Sur la perte d'information

Deux participants sur les onze ont appuyé pour signaler la perte d'information. L'un sur seulement deux conditions et deux fois dans chaque, l'autre sur six conditions également deux ou trois fois seulement avec un temps moyen ne dépassant pas 200 ms. Ceci ne constitue pas un échantillon suffisant pour être analysé. Le temps d'appui cumulé pour signaler une perte d'information correspondant à 0,04 % du temps total alloué à l'ensemble des conditions sur les onze participants.

Ces deux participants ont confirmé oralement qu'ils avaient perdu une information. Toutefois, la perte d'information signalée oralement diffère quelque peu des signalements à la manette. Ainsi, le premier indique avoir perdu la cible sur sept des huit essais en basses fréquences à 25% de contraste et le deuxième a signalé une perte pour onze des 28 essais. Un troisième participant, qui n'avait pas appuyé pour signaler une perte, a rapporté avoir perdu également la symbologie monoculaire une fois à cinq essais également répartis entre les conditions.

II.3.3.5. Sur le confort visuel

Aucun sujet n'a rapporté de fatigue visuelle dans l'ensemble des conditions. Concernant les symptômes évalués, seul un sujet a rapporté par deux fois une perception double du fond binoculaire pendant moins d'une seconde. Les performances qu'il a effectué à ces deux conditions ne semblent pas, pour autant, avoir été perturbées par cette perception double.

II.4. Discussion

L'objectif de cette deuxième étude était dans un premier temps de consolider nos résultats concernant l'amélioration des performances lorsque la symbologie monoculaire était soumise à pulsation. Dans un second temps, il s'agissait de tester différents profils de pulsation puisque celui construit dans l'étude I ne relevait pas d'une étude scientifique solide.

II.4.1. Impact des modifications méthodologiques

Evoquons tout d'abord, les modifications méthodologiques apportées entre les deux études. La génération d'un bruit blanc plutôt que des réseaux sinusoïdaux pour éviter les éventuelles perturbations perceptives induites par ce dernier n'a pas eu d'impact sur les

performances des participants que ce soit pour la performance de suivi ou les temps de détection. En atteste une absence de différence significative pour ces variables entre les deux types de fond. La modification de la taille de la cible a impacté les performances de suivi de la cible. Ces résultats confirment notre hypothèse qui postulait qu'en réduisant le rapport cible/symbologie monoculaire la tâche de suivi de cible serait complexifiée. Toutefois, ce n'est pas le cas pour la variable temps de détection ni pour le taux d'erreur (à 1,2 % pour l'étude I contre 2,08 % ici). Les pertes d'information relevées par les participants (oralement ou par l'appui sur une gâchette) n'étaient pas plus nombreuses avec une cible réduite (aucune perte signalée) qu'avec une cible de taille plus importante (une perte signalée). Ces résultats suggèrent que la tâche de suivi est bien complexifiée par la diminution de la taille de la cible mais que pour autant l'augmentation de la part de fond « texturé » dans le champ visuel ne semble pas avoir affecté le reste des performances et donc la rivalité binoculaire induite.

II.4.2. Effet d'un conflit interoculaire de type réalité augmentée monoculaire sur la perception et le confort

Peu de participants ont signalé des pertes d'information (*i.e.* 2) et elles représentent un temps infime vis-à-vis de la totalité de l'exposition (*i.e.* 0,038 %). Comme précédemment, on peut supposer que les faibles pertes d'information s'expliquent par la cohérence entre la symbologie (un anneau) et la cible (un cercle) qui limiterait la rivalité (Blake et Boothroyd, 1985). De plus, dans cette étude la cohérence entre la cible et la symbologie a été renforcée par la réduction de la taille de la cible ce qui a permis de diminuer encore plus les pertes d'information par rapport à la précédente étude.

Le nombre d'erreurs d'identification recensé sur l'ensemble des participants considérant toutes les conditions est très faible (*i.e.* 2,08 %) et l'exposition n'a conduit qu'à des plaintes contenues. Ces résultats confirment ceux de la précédente étude suggérant que les stimulations et les tâches choisies semblent permettre de limiter le phénomène de suppression et n'ont pas posé de grosses difficultés aux participants mais aussi qu'elles ne rendent probablement pas compte de l'ensemble des contraintes auxquelles expose la réalité augmentée monoculaire.

II.4.3. Influence des caractéristiques du fond binoculaire

Dans notre première étude, un effet de la fréquence spatiale et du contraste a été trouvé sur la variable performance de suivi. L'effet sur les fréquences spatiales ne se retrouve pas dans la présente étude mais concorde avec la deuxième étude de Hershberger et Guérin (1975) dans laquelle les caractéristiques du fond n'impactent pas la performance de suivi. Alors que nos résultats semblent se contredire concernant les fréquences spatiales, les résultats pour le contraste du fond sont cohérents. En effet, le contraste du fond a un impact équivalent sur les temps moyens de détection dans nos deux études. Les performances sont meilleures avec un fond en basses fréquences spatiales à faible contraste (20 % pour l'étude I

et 25 % pour l'étude II) comparées à la condition avec un fond à 100 %. Une fois de plus, cela s'explique par la différence de contraste entre le fond et l'évènement qui favorise sa détection comparée aux conditions de fond où leur contraste est le même.

II.4.4. Influence des caractéristiques d'affichage

Comme dans l'étude précédente et celle de Winterbottom et al. (2015), les résultats révèlent une meilleure détection des évènements binoculaires par rapport aux évènements monoculaires.

Il a été également confirmé que comme en condition naturelle de vision, en situation de conflit interoculaire, les performances sont meilleures pour détecter un évènement en petite excentricité qu'en grande excentricité.

Alors que dans l'étude précédente, il semblait opportun d'afficher la symbologie monoculaire à faible contraste et pulsée pour limiter l'effet de la rivalité binoculaire, nos résultats semblent plus nuancés. En effet, si l'on s'attarde sur le contraste de la symbologie monoculaire, les résultats sur la performance de suivi sont meilleurs au contraste maximal de 1 par rapport au contraste de 0,6. Cette différence par rapport à l'étude précédente peut s'expliquer par la diminution de la taille de la cible qui a rendu la tâche de suivi de la cible plus complexe et a donc nécessité un contraste plus élevé de la symbologie. L'augmentation du contraste entre la symbologie et la cible aurait pu générer plus de phénomènes de rivalité étant donné qu'une différence de contraste est plutôt connue pour dégrader la performance (Blake et Camisa, 1978 ; Levelt, 1965 ; Peli, 1990). Toutefois, dans ce cas, le bénéfice semble avoir été plus grand que l'effet potentiel de la rivalité.

Les résultats sur l'effet de la pulsation étaient plus tranchés dans la première que dans cette deuxième étude. En effet, dans l'étude I, la pulsation dégradait la performance de suivi de cible quelles que soient les caractéristiques du fond. Dans la présente étude, les performances sont stables quelles que soient les caractéristiques du fond et ne montrent un fléchissement qu'avec le profil de pulsation 3, comparées aux conditions sans pulsation ou avec les profils 1 et 2. Dans ce profil, chaque phase dure deux fois plus longtemps excepté la dernière phase (Figure 65). Nos résultats suggèrent, qu'avec ce type de profile, le fond domine davantage la perception et donc que la symbologie monoculaire ne sollicitera pas assez l'attention exogène. Ainsi, pour mieux solliciter cette attention, peut-être vaut-il mieux diminuer les durées des différentes phases du profil. Ceci semble cohérent avec une étude récente de Naber et al. (2020) qui montre qu'à la présentation de stimuli dichoptiques, des changements brusques de contraste d'un des stimuli sollicitent l'attention exogène conduisant à plus de perception mixte et donc moins de suppression.

Aucune différence significative n'a été trouvée entre les performances réalisées avec les profils 1 et 2. L'absence de surépaisseur de la symbologie monoculaire n'a ni dégradé ni amélioré les performances. Une tendance se dessine tout de même en faveur du profil 2 sur la variable temps de détection.

On retiendra de la présente étude qu'il ne semble pas opportun d'utiliser un profil avec des phases de variation des luminances plus longues (profil 3) (Figure 68) et qu'il convient de privilégier une symbologie à un contraste maximal de 1 (Figure 69), qu'il soit pulsé en profil 2 ou non pulsé (Figure 68). Les résultats de nos deux études concernant à la fois les performances en fonction des caractéristiques du fond mais également les profils de pulsation devront être confrontés à une étude plus représentative des stimulations en vol afin de pouvoir les confirmer.

III. Evaluation des paramètres d’affichage en simulateur avec un dispositif de réalité augmentée monoculaire semi-transparent (étude écologique)

III.1. Introduction	126
III.2. Méthode	127
III.2.1. Participants	127
III.2.2. Matériel.....	127
III.2.3. Stimuli	129
III.2.4. Tâche.....	134
III.2.5. Procédure.....	136
III.2.6. Recueil des données	136
III.2.7. Analyse statistique	136
III.3. Résultats	138
III.3.1. Effet de l’entraînement.....	138
III.3.2. Effet de l’œil de présentation	138
III.3.3. Effet des caractéristiques des stimulations	141
III.3.3.1. Sur la performance de suivi de cible	141
III.3.3.2. Sur le temps de détection	142
III.3.3.3. Sur la perte d’information.....	143
III.3.3.4. Sur le confort visuel.....	147
III.4. Discussion	147
III.4.1. Impact de l’œil de présentation.....	147
III.4.2. Effets de la réalité augmentée monoculaire sur la perception et les performances de pilotage	148
III.4.3. Influence des conditions environnementales.....	149
III.4.4. Influence des caractéristiques d’affichage.....	150

III.1. Introduction

Nos deux précédentes études se sont penchées sur l'impact des caractéristiques des stimulations visuelles (fréquences spatiales, contraste) et de l'attention exogène sur les performances et le confort visuel avec un dispositif simulant les systèmes de réalité augmentée monoculaires. Ces paramètres font généralement varier la dynamique de la rivalité binoculaire lors de la présentation d'images dichoptiques. Le port d'un système de réalité augmentée semi-transparent monoculaire génère une perception particulière. La plupart du temps l'image monoculaire se superpose au fond binoculaire sans générer de trouble perceptif. Il est rapporté pourtant comme évoqué dans l'état de l'art, que certains pilotes subissent des pertes d'information, caractéristiques de la rivalité binoculaire (Behar et al., 1990 ; Capo-Aponte et al., 2009 ; Rash et al., 1999).

Afin de répondre à nos hypothèses de façon applicative, cette troisième étude a pour objectif d'évaluer les performances et le confort visuel perçu, dans un contexte plus écologique, munis d'un casque de réalité augmentée monoculaire semi-transparent, le TopMax®. La symbologie de vol, plus complète que celle utilisée jusqu'à présent, est alors projetée en monoculaire sur un environnement vu binoculairement et issu d'un simulateur de vol. Le casque de réalité augmentée monoculaire semi-transparent a pour vocation de suppléer ou remplacer les HUD actuels notamment lors du roulage, du décollage et de l'atterrissage. C'est cette dernière phase qui a été simulée dans notre étude, puisque c'est la plus critique des trois¹ (29 % d'accident fatals en phase finale d'approche, 7 % au roulage et 11 % au décollage).

Les performances mesurées étaient semblables à celles mesurées dans les expérimentations précédentes à savoir, le suivi de cible, la détection de cibles, la perte d'information visuelle des participants et le confort visuel.

Notre première étude avait montré un effet de l'œil que pour peu de participant et l'état de l'art ne s'entend guère quant à l'effet de l'œil de présentation de l'image monoculaire sur les performances (Cupero et al., 2009 ; Hershberger et Guerin, 1975). Toutefois, il semblait important de vérifier notre résultat en condition plus écologique. L'aspect amovible du casque a permis de tester les performances avec la symbologie sur chacun des yeux. Etant donnés les résultats du test de sensibilité au flou qui est celui des tests de dominance oculaire le plus à même de prédire l'œil le plus performant, nous avons inclus ce test à posteriori pour un maximum de participants. Cette mesure a été réalisée quelques mois après le passage sur simulateur.

¹Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents ; Worldwide Operations ; 1959-2019, http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf, consulté le 25 Janvier 2021

Les auteurs évoqués dans l'état de l'art ont évalué des performances en termes de détection de cible (Hershberger et Guerin, 1975 ; Winterbottom, R. E. Patterson, et al., 2006 ; Winterbottom et al., 2015), de suivi de cible (Hershberger et Guerin, 1975) et de visibilité de l'image monoculaire (Hershberger et Guerin, 1975) sur le fond binoculaire. Dans notre étude, comme les précédentes, nous avons reproduit le même type de tâches puisqu'elles peuvent s'apparenter à des tâches de pilotage.

En vol, il faut avoir une perception de la symbologie mais également de l'environnement. Il faut donc veiller, non pas à ce que la symbologie soit dominante sur le fond en permanence, mais faire en sorte que les paramètres d'affichages soient réglés pour réduire l'apparition de la rivalité binoculaire. L'enjeu était donc d'évaluer si les bénéfices obtenus pour les performances via l'ajustement du contraste de la symbologie et de la pulsation de l'élément le plus critique de la symbologie (ici le vecteur vitesse) étaient confirmés en condition plus écologique.

Du fait des conséquences en termes de pertes d'informations visuelles et de confort visuel que peut provoquer la rivalité binoculaire, il semble important de déterminer comment elle se manifeste dans le contexte aéronautique. L'évaluation du phénomène avec une stimulation écologique permettra de limiter d'avantage ses conséquences opérationnelles.

III.2. Méthode

III.2.1. Participants

22 participants non-pilotes ont pris part à cette étude : onze femmes et onze hommes âgés de 21 à 59 ans (moyenne $33,8 \pm 12,09$ ans). Les critères d'inclusion étaient les mêmes que les études précédentes (I.2.1.1).

L'étude a été menée conformément à la Déclaration d'Helsinki et a satisfait aux exigences légales locales (N IDRCB : 2018-A01331-54).

III.2.2. Matériel

Le dispositif de réalité augmentée monoculaire qui a été utilisé pour cette expérimentation est le TopMax® (Figure 72). Il se compose d'un bandeau ajustable sur lequel est fixé un imageur projetant une image, générée par ordinateur, sur une lame semi-transparente. L'imageur est modulable. Il peut être fixé devant l'œil gauche ou l'œil droit.



Figure 72 : Casque de réalité augmentée semi-transparent monoculaire, le TopMax®

La symbologie était asservie en temps réelle aux mouvements de la tête de l'utilisateur. Cet asservissement est garanti grâce à une caméra infra-rouge qui enregistre la position de marqueurs disposés au-dessus de l'utilisateur. Ces marqueurs, appelés fiduciels, sont tous différents et forment une constellation positionnée au-dessus des participants. La matrice de leur position étant connue par l'ordinateur, chaque déplacement de la caméra modifie la position de ces marqueurs dans l'espace permettant ainsi de connaître la position et le mouvement de la tête du participant en temps réel. Bien que la position de la tête ne soit pas une mesure enregistrée, elle permet de récupérer la position des informations projetées.

L'image projetée sur la lame semi-transparente est collimatée à l'infini. La scène binoculaire est projetée sur un écran. Afin de réduire le conflit d'accommodation entre la symbologie du TopMax® et l'écran, ce dernier a été placé au plus loin du participant, soit 6 m. Il est considéré, que l'œil humain a une focalisation lointaine à partir de 5 m. Le participant était donc assis à 6,00 m d'un écran, de 2,10 m de haut et 3,30 m de large, sur lequel une image était projetée à 60 Hz à l'aide d'un vidéoprojecteur (Figure 73). L'image ainsi obtenue mesurait 30,75° en horizontal pour 19,85° en vertical avec une résolution de 2560 x 1600 px. La distance de 6 m permet d'obtenir un champ de vision supérieur à celui du TopMax (26° par 20°) et assure donc la perception de la symbologie sur l'écran. Pour limiter les effets de parallaxe, il fallait que l'image du casque TopMax® soit centrée avec celle de l'écran.

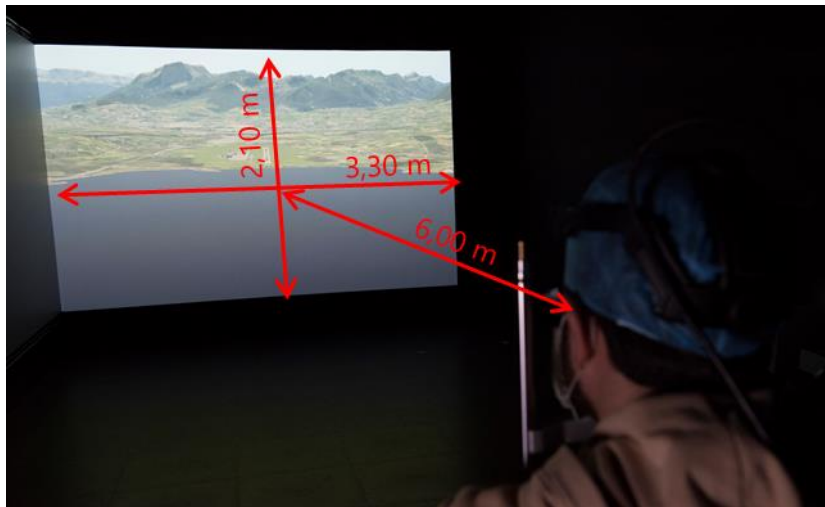


Figure 73 : Ecran sur lequel était vidéoprojeté le fond binoculaire

Le participant était assis à 6,00 m d'un écran de 3,30 m par 2,10 m.

Le scénario préenregistré ayant été joué en simulateur avec une position fixe du regard du pilote virtuel pendant toute la stimulation, la tête du participant était positionnée sur une mentonnière afin de limiter les mouvements pendant chaque approche.

L'étude a été menée dans une salle d'expérimentation noire avec aucune autre stimulation visuelle que celle proposée par l'écran et la symbologie.

Un joystick (Hotas Warthog, Thrustmaster, Carentoir, France) est utilisé pour réaliser les différentes tâches. Il est positionné à la droite des participants (Figure 81).

Le matériel utilisé pour le test de sensibilité est le même que celui de l'étude I (voir paragraphe I.3.1.2.7).

III.2.3. Stimuli

La scène binoculaire projetée sur l'écran consistait en une vidéo préenregistrée d'une approche sur la piste de Chambéry (LFLB) réalisée en amont, en simulateur, grâce au logiciel XPlane11 (Laminar Research, Columbia, SC, Etats-Unis). Ce logiciel permet de rejouer un scénario en changeant les caractéristiques visuelles de la scène (hauteur de la couche nuageuse, heure, hydrométrie, vent, etc...).

Afin d'identifier l'impact des caractéristiques du fond binoculaire, les approches ont été réalisées selon trois conditions environnementales. Une condition de jour par temps dégagé, une condition de jour par temps nuageux et une condition de nuit par temps dégagé (Figure 74).

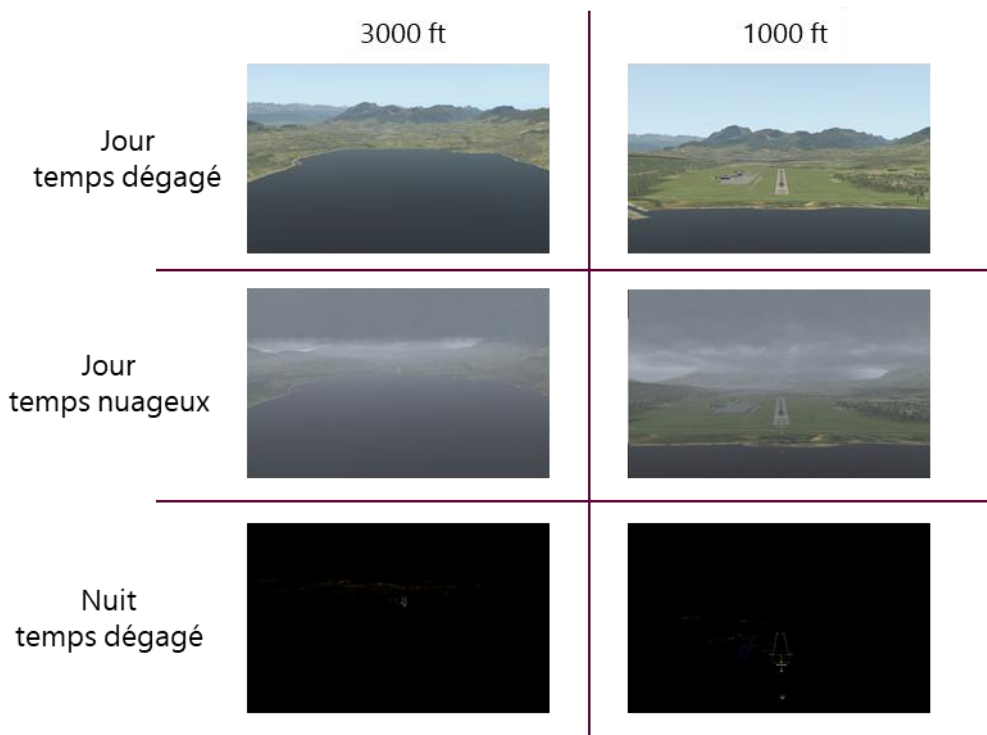


Figure 74 : Conditions environnementales simulées en fonction de l'altitude de l'aéronef

L'essai commence à une hauteur de 3000 ft et se termine avec une altitude d'environ 1000 ft.

La luminance moyenne et la distribution des fréquences spatiales de chaque condition environnementales a été mesurée (Tableau 13 et Figure 75).

Tableau 13 : Luminances moyennes et écart-types des images

	Luminance moyenne	Écart-type
Jour temps dégagé	12,4 cd/m ²	6,18
Nuit temps dégagé	0,024 cd/m ²	0,43
Jour temps nuageux	11,5 cd/m ²	2,57

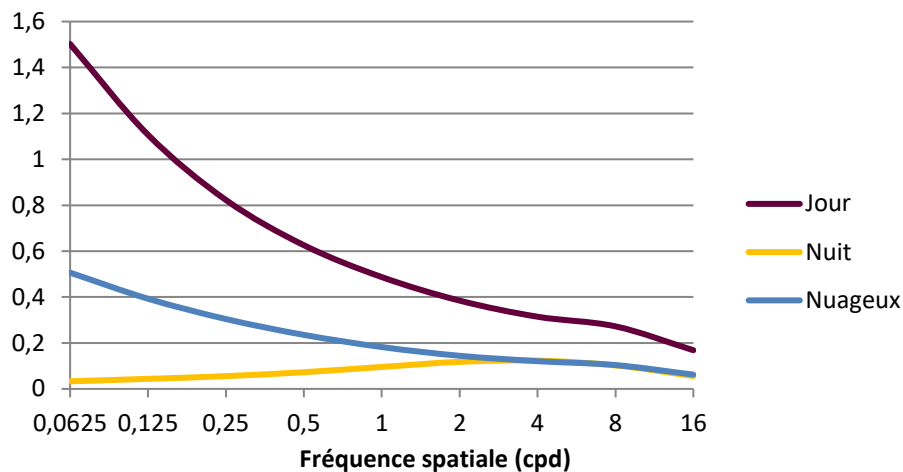


Figure 75 : Distribution des fréquences spatiales en fonction des conditions du fond binoculaire

L'image virtuelle projetée dans le casque était une symbologie de vol comprenant les échelles d'altitude et de vitesse, des informations d'aides au pilotage avec les indicateurs d'activation du pilotage automatique (*autopilot* ou AP) et de l'auto-manette (*auto throttle* ou AT), l'horizon artificielle, le vecteur vitesse (*flight path vector* ou FPV) et la piste synthétique dont le centre est matérialisé par le directeur de vol (*flight director* ou FD) (Figure 76). Il n'a pas été possible de se soustraire à l'information de la piste synthétique et du FD puisque sans, il n'y aurait pas eu d'information vérifiant la bonne harmonisation entre la symbologie et la piste réelle. La piste synthétique devant être superposée avec la piste réelle avant chaque approche.

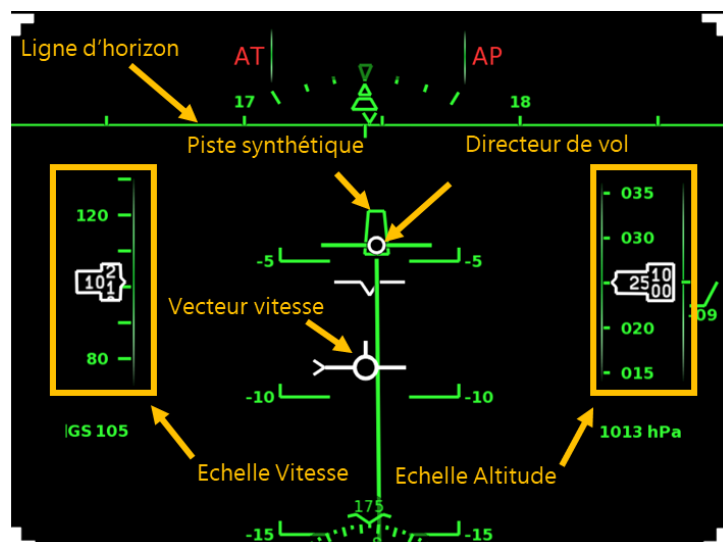


Figure 76 : Symbologie utilisée dans le TopMax® (légende en jaune)

La lame semi-transparente à travers laquelle on perçoit l'image monoculaire superposée à l'environnement est plus complexe qu'il n'y paraît. En effet, cette perception semi-transparente est possible grâce à la technologie des micro-écrans à cristaux liquides

ferroélectriques sur sillicium*. Technologie complexe, elle ne sera pas détaillée ici mais il faut retenir que chaque pixel de l'image est capable de transmettre plus ou moins le faisceau lumineux de l'imageur. On parle alors d'opacité du pixel. Plus le pixel est opaque, plus il est visible et donc moins il laisse passer la lumière. Le profil de pulsation dans cette étude consiste donc à faire varier cette opacité du vecteur vitesse (FPV) au cours du temps. Chaque période de pulsation débute avec les pixels qui composent le vecteur vitesse avec une opacité maximale, le FPV est alors vu avec une luminance maximale (Figure 78). L'opacité diminue progressivement pendant 500 ms jusqu'à atteindre une opacité de 40% (Figure 78). En se basant sur l'étude II, il a été choisi d'utiliser un profil de pulsation de type 2 oscillant d'une opacité de 100 % (luminance maximale) et ne descendant pas en dessous de 40 %.

Deux luminances de symbologie ont été testées. Une luminance à 100% de la luminance maximum de l'imageur et une luminance à 70 %.

Les niveaux de luminance et d'opacité ont été déterminés de façon empirique de sorte que les variations soient perceptibles.

Il a également été testé des conditions sans et avec pulsation du vecteur vitesse (FPV). Un seul profil a été testé basé sur les résultats de l'étude II (Figure 77).

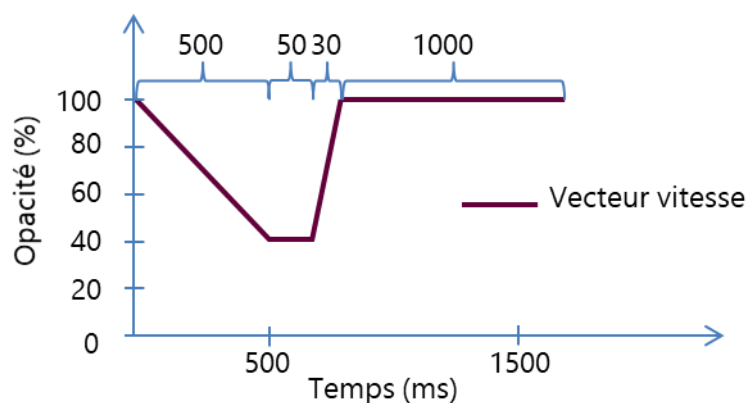


Figure 77 : Profil de la pulsation à opacité maximale de 100 %

Le taux d'opacité des pixels associés au vecteur vitesse passe de 100 % à 40 % en 500 ms puis reste constant à ce niveau pendant 50 ms. Il est ensuite augmenté pendant 30 ms jusqu'à atteindre son opacité maximale de 100 %.

* Voir Annexe 1 : Glossaire



Figure 78 : Opacité maximale (100 %) et minimale (40 %) du FPV quand il est soumis à pulsation

Les évènements à détecter correspondent au mot « warning » d'une taille de $5^\circ \times 1^\circ$ qui apparaissaient en écriture blanche sur fond rouge (Figure 79). Quatre évènements (deux en monoculaire et deux en binoculaire) apparaissent aléatoirement après les quinze premières secondes et avant les quinze dernières secondes de l'approche. Ils s'affichent pendant 1,5 secondes et sont séparés d'au moins cinq secondes. Nous avons émis l'hypothèse que l'apparition des seize évènements dans les études précédentes sollicite l'attention exogène sur ces évènements et réduit l'apparition de la rivalité binoculaire entre la symbologie monoculaire et le fond. Dans cette étude, nous avons donc réduit le nombre d'évènements également pour simuler une condition écologique dans laquelle il n'y a pas autant d'alertes.

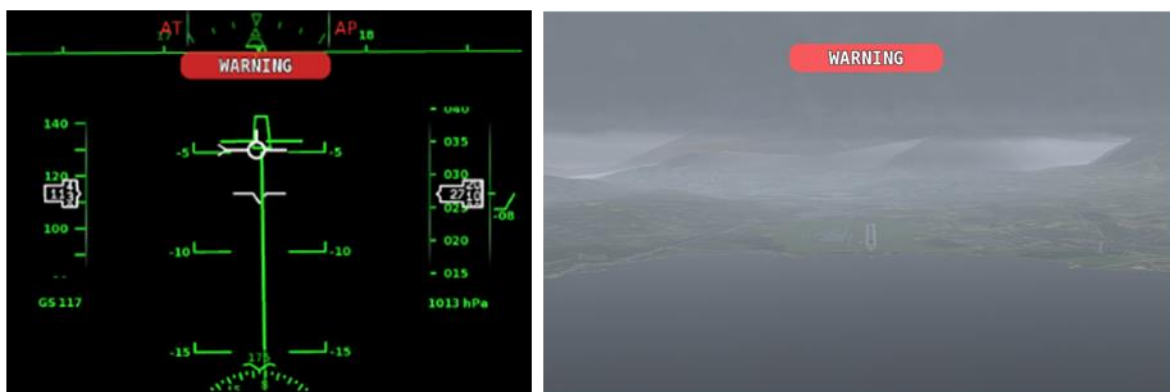


Figure 79 : Evènement présenté avec la symbologie (gauche) ou sur le fond binoculaire (droite)

Les performances ont été évaluées selon 24 conditions (Figure 80) :

- 2 yeux (symbologie monoculaire placée aléatoirement sur l'œil droit ou l'œil gauche) ;
- x 3 conditions environnementales ;
- x 2 luminances ;
- x 2 pulsations (avec ou sans).

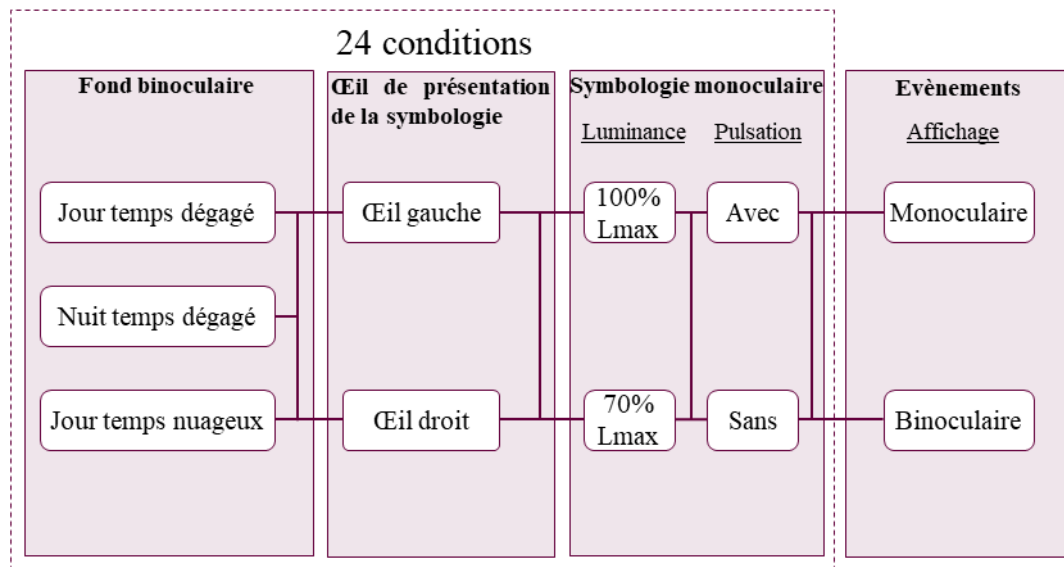


Figure 80 : Conditions d'affichage du fond binoculaire et de la symbologie monoculaire

Dans chaque condition étaient présentés des évènements pouvant être affichés sur un œil ou sur les deux yeux.

III.2.4. Tâche

La tâche de suivi de cible consistait à faire coïncider, à l'aide du joystick (Figure 81), le centre du vecteur vitesse (FPV) avec le centre du directeur de vol (FD) matérialisant le seuil de piste projeté sur l'écran (Figure 82).



Figure 81 : Fonctionnement du joystick pour la tâche de suivi de cible

Pour diriger le FPV à droite il faut positionner le manche à droite, pour aller à gauche, vers la gauche. Pour faire descendre l'aeronef, il faut pousser le manche et le tirer pour le faire monter.

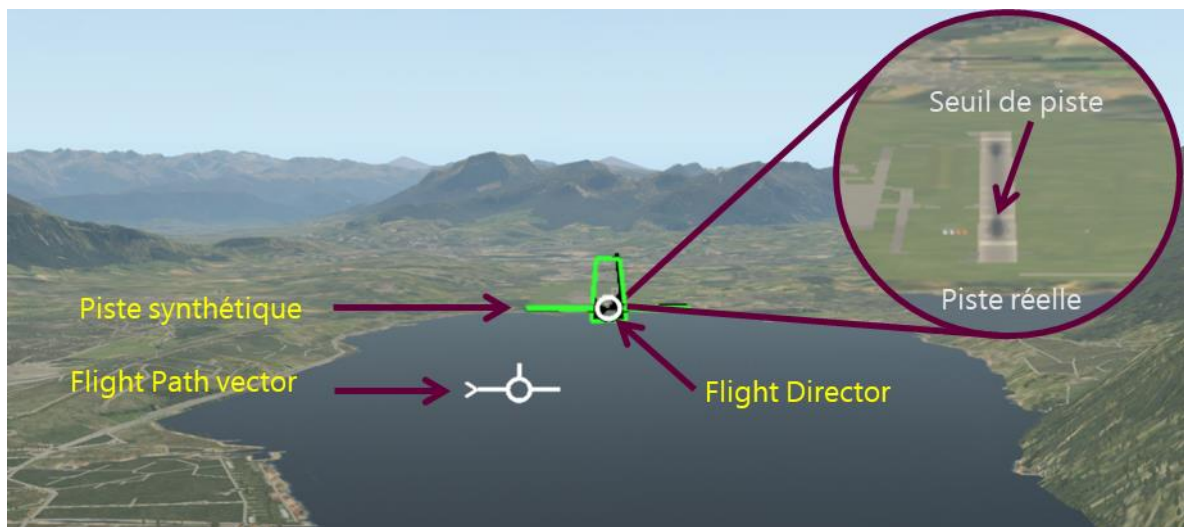


Figure 82 : Éléments de la symbologie monoculaire (légende en jaune) et de la scène binoculaire (légende en blanc) nécessaires à la réalisation de la tâche de suivi de cible

Le vecteur vitesse suivait une trajectoire identique quelle que soit la condition tout au long de l'approche (Annexe 5). Cette tâche s'inspire de la tâche de pilotage lors de l'atterrissage. D'une durée de 120 s, l'essai commence à une hauteur de 3000 ft et se termine avec une altitude d'environ 1000 ft. La simulation s'arrêtait bien avant le posé de l'appareil qui relève d'une tâche de pilotage trop complexe pour notre population et inintéressante pour notre problématique.

Parallèlement, le participant devait détecter le plus rapidement possible la présence du warning par l'appui d'un bouton situé sur le joystick avec le pouce droit. De plus, si une partie ou l'ensemble du fond binoculaire ou de la symbologie monoculaire était supprimé visuellement par le participant, il avait la possibilité de l'indiquer par l'appuie sur le bouton à l'avant du joystick (Figure 83).



Figure 83 : Boutons du joystick utilisés pour la tâche de détection d'évènement et le signalement d'une suppression visuelle

Le bouton pour signaler une suppression était appuyé à l'aide du pouce de la main droite et le bouton pour signaler la détection de l'évènement avec le majeur de la main droite.

III.2.5. Procédure

Une fois que les instructions avaient été données au participant, que son consentement avait été signé et que les critères d'inclusion avaient été vérifiés, le participant était équipé du TopMax® avec l'imageur placé sur l'un des deux yeux, déterminé aléatoirement en amont. Il devait ensuite se placer assis devant l'écran et se positionner sur la mentonnière afin de maintenir sa tête stable pendant chaque condition. Une bonne harmonisation grâce aux fiduciaux entre la symbologie et le fond binoculaire était validée oralement par le participant s'il percevait la piste réelle dans la piste synthétique et l'horizon bien à l'horizontal.

Etant donné le grand nombre de conditions, le passage de chaque participant était divisé en deux sessions. La première session comprenait un premier essai de familiarisation en condition « jour temps dégagé » avec le FPV monoculaire pulsé en luminance maximale puis une séquence de 12 conditions aléatoire sur un œil. La deuxième session comprenait le même essai de familiarisation que la session précédente et le passage des 12 autres conditions randomisées avec la symbologie monoculaire sur l'autre œil. Chaque approche durait deux minutes et chaque session une heure chacune.

III.2.6. Recueil des données

La performance de suivi a été mesurée comme l'erreur moyenne, en minutes d'arc, entre le centre du cercle matérialisant le seuil de piste et le centre du vecteur vitesse (FPV).

La performance de détection a été évaluée comme le temps, en millisecondes, entre l'apparition de l'évènement et l'appui par le participant sur le bouton réponse. Il est à noter que tous les participants quelle que soit la condition ont détecté le warning.

La variable perte d'information correspond au nombre d'appui pour chaque condition. A la fin de chaque essai, il a été demandé au participant de confirmer oralement la perte ou non d'une information visuelle (d'un symbole monoculaire ou une partie du fond).

La mesure du confort s'est faite via le même questionnaire que dans les études précédentes (Annexe 2).

Une fois les deux sessions effectuées par les participants, il leur été demandé l'œil avec lequel ils avaient préférés avoir l'image monoculaire.

La mesure de la dominance oculaire déterminée par le test de sensibilité au flou a suivi la même procédure que dans l'étude I (voir paragraphe I.3.1.2.7).

III.2.7. Analyse statistique

Pour évaluer si un effet d'entraînement était perçu lors de la deuxième session, une ANOVA à mesures répétées impliquant le facteur session a été effectuée sur la performance de suivi et le temps de détection. Le nombre de perte d'information étant plus important que

dans les précédentes études, l'effet d'entraînement a également pu être vérifié sur cette variable. Il a été évalué via un test χ^2 sur le nombre de pertes signalées par l'appui du bouton en première session et en deuxième session.

Pour évaluer l'effet de l'œil de présentation, un t-test apparié a été réalisé entre les performances obtenues (*i.e.* performance de suivi de cible, temps de détection) avec la symbologie monoculaire sur l'œil droit et celles réalisées avec la symbologie monoculaire sur l'œil gauche pour chaque participant. Pour évaluer un effet de l'œil de présentation sur la perte d'information signalée par l'appui du bouton, un test χ^2 a été réalisé par participant entre le nombre d'appuis réalisé lorsque l'image monoculaire est sur l'œil droit et lorsqu'elle est sur l'œil gauche.

Un t-test apparié pour chaque condition environnementale a été effectué entre les performances réalisées avec le meilleur œil et celles réalisées avec le moins bon.

De la même façon, un test χ^2 pour chaque condition environnementale a également été réalisé sur les pertes d'information.

Une ANOVA à mesures répétées sur la performance de suivi de cible a été réalisée impliquant les facteurs des conditions environnementales et des caractéristiques de la symbologie monoculaire (luminance et pulsations du FPV).

Il a également été réalisé une ANOVA à mesures répétées sur les temps de détection considérant les facteurs des conditions environnementales, de l'affichage de la symbologie monoculaire et des événements (monoculaire/binoculaire).

Comme dans nos deux études précédentes, deux mesures pour caractériser la perte d'information ont été réalisées. La nombre d'appui cumulé pendant un essai tout d'abord puis le nombre de pertes rapportées oralement par le participant à la fin de chaque essai ensuite.

Concernant le signalement par l'appui bouton de la perte d'information, un test χ^2 a été réalisé en fonction des trois conditions environnementales tout d'abord puis entre elles deux à deux. Pour chaque condition environnementale ensuite, des tests χ^2 ont été réalisés pour évaluer les effets de la luminance de la symbologie monoculaire d'une part et de la pulsation du FPV d'autre part (soit six tests χ^2). Un autre test χ^2 a été réalisé pour tester l'interaction entre la luminance et la pulsation. Pour ce qui est du signalement oral de la perte d'information à la fin de chaque essai, cette variable n'a pas fait l'objet d'analyse statistiques car il a été difficile pour les participants de dénombrer avec exactitude les pertes une fois l'essai terminé (épisodes trop nombreux).

Le confort visuel n'a pas mené à une analyse statistique étant donné le faible échantillon quant à ses résultats.

III.3. Résultats

Tout comme les deux études précédentes, il sera présenté dans un premier temps les résultats concernant l'effet d'entraînement, les essais étant répartis sur deux sessions à deux jours différents (III.3.1). Puis, les résultats évaluant les performances et le confort visuel selon l'œil de présentation (III.3.2) seront présentés. Enfin, les résultats évaluant les performances et le confort visuel selon les caractéristiques des stimulations seront détaillés (III.3.3).

III.3.1. Effet de l'entraînement

Selon les résultats des deux ANOVA réalisées, aucune différence significative a été constatée sur les performances de suivi ($F(1,40) = 0,03$; $p = 0,87$) et sur les temps moyens de détection ($F(1,40) = 0,25$; $p = 0,62$) entre la première et la deuxième session.

Le test χ^2 sur la perte d'information révèle en revanche un effet des sessions mais pas nécessairement de l'entraînement sur la perte d'information ($p = 0,03$) puisqu'il y a plus de pertes signalées en deuxième (1264) qu'en première session (1041).

III.3.2. Effet de l'œil de présentation

Alors que trois participants n'ont jamais appuyé pour signaler une perte d'information, quelles que soient les caractéristiques du fond binoculaire ou de la symbologie monoculaire, pour la variable performance de suivi, dix-sept participants ont un effet de l'œil de présentation (Tableau 14).

Sept participants ont un effet de l'œil de présentation considérant la variable temps de détection (Tableau 14).

Enfin, six participants ont plus de pertes d'information sur un œil que sur l'autre (Tableau 14).

Pour chacune de ces variables, lorsqu'une différence significative entre les deux yeux est trouvée, il peut être déterminé l'œil le plus performant de chaque participant. Le Tableau 14 présente la répartition de notre échantillon en fonction de ces données. Il présente également les données des participants n'ayant pas d'effet de l'œil de présentation.

Tableau 14 : Répartition des participants en fonction de l'œil le meilleur

Lorsqu'une différence significative est trouvée entre les deux yeux, les valeurs de l'ensemble des participants ayant l'œil droit meilleur sont moyennées. Il en est fait de même lorsque l'œil gauche est le meilleur. Lorsqu'aucune différence n'est trouvée, les valeurs de l'œil droit de l'ensemble des participants n'ayant pas de différence sont moyennées. Il en est fait de même avec l'œil gauche.

Variable	Œil droit fort		Œil gauche fort		Non significatif		N
Erreur à la cible	N = 13		N = 4		N=5		22
	OD	OG	OD	OG	OD	OG	
	Moyenne	13,15	17,01	13,56	10,01	13,26	
Écart-type	4,14	6,48	3,96	2,92	3,511	4,29	
Temps moyen de détection	N = 6		N = 1		N = 15		22
	OD	OG	OD	OG	OD	OG	
	Moyenne	730,30	810,16	750,85	702,26	772,24	
Écart-type	97,54	137,43	56,83	39,29	78,97	101,61	
Perte d'information	N = 4		N = 2		N = 13		19
	OD	OG	OD	OG	OD	OG	
	Moyenne	34	99,25	164,5	75	55,38	
Écart-type	37,21	57,59	64,35	12,73	40,14	39,52	
Pourcentage	25,71 %	74,29 %	68,68 %	31,32 %	51,64 %	48,36 %	

Nous avons également évalué l'effet de l'œil selon chaque condition environnementale pour les participants ayant un œil avec lequel ils sont plus performants (Tableau 15).

Tableau 15 : T-test (i.e. performance de suivi et temps de détection) et Chi² (i.e. perte d'information) en fonction de l'œil de présentation pour chaque condition environnementale

Erreur à la cible	Jour temps dégagé		Nuit temps dégagé		Jour temps nuageux	
	Fort	Faible	Fort	Faible	Fort	Faible
Moyenne	12,69	16,73	12,84	16,97	12,02	14,91
<i>p-value</i>	< 0,01		< 0,001		< 0,001	
Temps moyen de détection	Fort	Faible	Fort	Faible	Fort	Faible
Moyenne	735,57	817,23	717,68	800,91	725,63	786,73
<i>p-value</i>	< 0,01		< 0,01		< 0,01	
Perte d'information	Fort	Faible	Fort	Faible	Fort	Faible
Nombre	90	241	167	297	29	184
Pourcentage	27,19 %	72,81 %	35,99 %	64,01 %	13,62 %	86,38 %
<i>p-value</i>	< 0,001		< 0,01		< 0,001	

La différence entre l'œil fort et l'œil faible des participants ayant un effet de l'œil est retrouvée quelles que soient les conditions environnementales.

Pour chacun des participants ayant un œil significativement meilleur à au moins une des trois variables mesurées, il est présenté l'œil avec lequel ils ont préférés porter l'image monoculaire et quand cela a été fait, l'œil dominant au test de sensibilité au flou (Tableau 16). On observe que pour cinq des onze participants pour lequel le test de sensibilité au flou a été réalisé, il y a une correspondance entre ce dernier et l'œil meilleur à au moins une des variables. De plus, quand il y a un effet de l'œil pour la variable perte d'information, l'œil préféré déterminé par le participant est celui avec lequel il y a eu le moins de pertes pour 100 % (N = 6) des cas.

Tableau 16 : Répartition des participants en fonction de l'œil le meilleur de trois variables mesurées, de l'œil préféré et du résultat au test de sensibilité au flou

OD = Œil droit ; OG = Œil gauche ; Ø = indéterminable ; NS = non significatif ; *Effet de l'œil de présentation

Pour chaque variable, il est noté l'œil le meilleur lorsqu'il y en a un. Il est mis en regard de l'œil dominant trouvé par le test de sensibilité au flou et de l'œil préféré. En gras, il est mis en valeur les cas où le meilleur œil sur les différentes variables est cohérent avec le test de dominance.

	Performance de suivi	Temps de détection	Perte d'information	Œil préféré	Test sensibilité au flou
S1	OD*	NS	OG*	OG	Ø
S2	OD*	NS	NS	OG	OG
S3	OG*	NS	NS	OG	OD
S4	OD*	NS	OD*	OD	OD
S5	NS	NS	OD*	OD	OD
S6	OD*	NS	Ø	Ø	OG
S7	OD*	NS	OD*	OD	OD
S8	NS	OD*	NS	OD	Ø
S9	OD*	NS	NS	OG	OG
S10	OD*	OD*	NS	OG	Ø
S11	OD*	NS	NS	OD	Ø
S12	OD*	NS	OD*	OD	Ø
S13	OD*	OD*	NS	OD	OD
S14	NS	OD*	NS	OD	Ø
S15	OG*	NS	OG*	OG	Ø
S16	OG*	NS	NS	OG	Ø
S17	NS	OD*	NS	OG	Ø
S18	OG*	OG*	Ø	OD	OG
S19	OD*	NS	NS	OD	OG
S20	OD*	NS	NS	OG	Ø
S22	OD*	OD*	Ø	OG	OG

III.3.3. Effet des caractéristiques des stimulations

III.3.3.1. Sur la performance de suivi de cible

La moyenne de la distance à la cible caractérisant la performance de suivi a été non pas mesurée sur toute la condition mais après dix secondes de stimulation. En effet, le vecteur vitesse (FPV) démarrant aléatoirement sur sa trajectoire prédéfinie, la performance de suivi de cible des dix premières secondes était aléatoire selon les conditions et ne devait donc pas être prise en compte.

Etant donné l'effet de l'œil de présentation, les performances de suivi de cible ont ensuite été analysées via une ANOVA à mesures répétées prenant en compte l'œil le meilleur et le moins bon selon les facteurs conditions environnementales et les caractéristiques de la symbologie monoculaire. Ceci avait pour but d'évaluer de potentielles interactions entre les yeux et les caractéristiques des stimulations.

Un effet des conditions environnementales a été trouvé ($F(2,42) = 5,34$; $p < 0,01$). L'analyse post-hoc révèle que les performances sont meilleures lorsqu'est projeté le fond binoculaire de jour par temps nuageux ($13,29 \pm 4,21'$) que de jour par temps dégagé ($14,56 \pm 5,08'$) ($p < 0,01$) ou de nuit par temps dégagé ($14,66 \pm 4,39'$) ($p < 0,01$) (Figure 84).

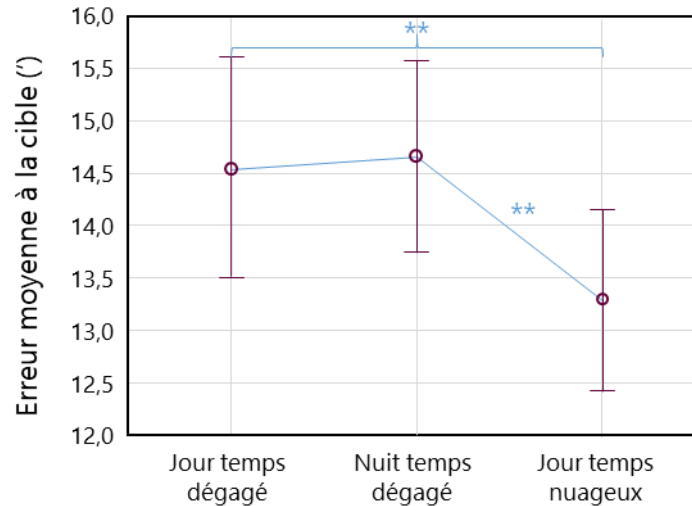


Figure 84 : Performance de suivi (erreur moyenne à la cible en minutes d'arc) en fonction des conditions environnementales

Les barres verticales violettes représentent l'erreur standard. Une différence significative entre deux conditions est représentée en bleu par deux étoiles ($p < 0,01$).

Les caractéristiques de la symbologie monoculaire n'ont pas eu d'effet sur les performances de suivi et aucune interaction entre l'œil de présentation et les caractéristiques des stimulations n'a été trouvée.

III.3.3.2. Sur le temps de détection

L'ANOVA à mesures répétées sur les temps de détection considérant les facteurs des conditions environnementales, de l'affichage de la symbologie monoculaire et des événements (monoculaire/binoculaire) ne révèle pas d'interaction impliquant plus de trois facteurs, nous n'avons pas eu à séparer les analyses comme nous l'avons fait dans l'étude I.

Cette ANOVA révèle une interaction entre les conditions environnementales et la luminance ($F(2,42) = 3,52$; $p = 0,04$). L'analyse post-hoc indique qu'en condition de nuit, la présence d'une symbologie monoculaire de luminance élevée, augmente le temps de détection ($790,44 \pm 113,36$ ms) par rapport à la même condition avec une luminance plus faible ($753,00 \pm 89,01$ ms) ($p < 0,01$). De plus, à luminance maximale, les temps de détection sont plus courts par temps nuageux ($760,38 \pm 113,92$ ms) que de nuit ($788,83 \pm 103,06$ ms) ($p = 0,04$) (Figure 85).

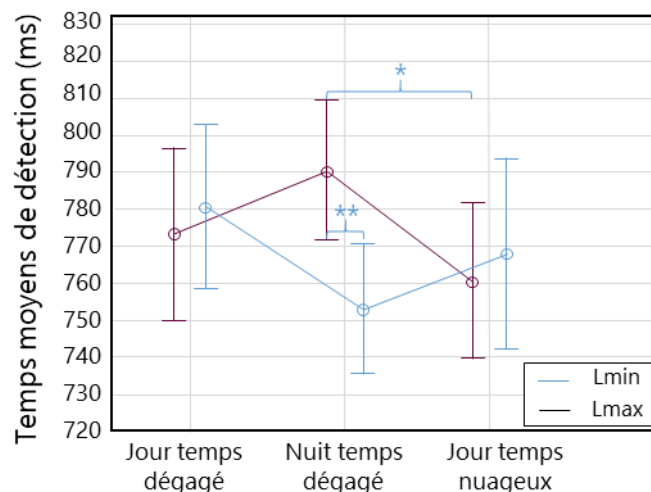


Figure 85 : Temps moyens de détection (en ms) en fonction des conditions environnementales et de la luminance de la symbologie monoculaire

Les barres verticales représentent l'erreur standard. Les points violets correspondent aux temps moyens réalisés avec la luminance maximale (100 %) de la symbologie monoculaire et les points bleus avec la luminance plus faible (70 %). Une différence significative entre deux conditions est représentée en bleu par une ($p < 0,05$) ou deux étoiles ($p < 0,01$).

L'ANOVA révèle également un effet de l'affichage des événements ($F(1,21) = 5,21$; $p = 0,03$). Les temps de détection se révèlent être plus courts pour les événements affichés en monoculaire ($760,90 \pm 19,15$ ms) qu'en binoculaire ($780,44 \pm 19,93$ ms).

Aucun effet de la pulsation du FPV n'a été mis en évidence pour le temps de détection de l'évènement et aucune interaction entre l'œil de présentation et les caractéristiques des stimulations n'a été trouvé.

III.3.3.3. Sur la perte d'information

Les pertes d'information signalées oralement concernent uniquement le vecteur vitesse (FPV). Aucune perte de fond binoculaire n'a été répertoriée. Il y a au total 2337 pertes d'information signalées sur les 528 essais réalisés (22 participants x 24 conditions). Le temps d'appui cumulé pour signaler une perte d'information correspondant à 3,25 % du temps total alloué à l'ensemble des conditions sur les 22 participants.

Le nombre de perte a été cumulé en fonction des conditions environnementales et des caractéristiques de la symbologie monoculaire.

Un effet des conditions environnementales est trouvé par le premier test Chi² réalisé ($p < 0,001$). La condition de nuit répertorie le plus de pertes, suivi de la condition de jour par temps dégagé. La condition de jour par temps nuageux est celle qui répertorie le moins de perte du vecteur vitesse (Tableau 17).

Tableau 17 : Test Chi² sur le nombre de perte d'information en fonction des conditions environnementales

Perte d'information	Jour temps dégagé	Nuit temps dégagé	Jour temps nuageux
Nombre	880	1040	417
Pourcentage	37,66 %	44,50 %	17,84 %
<i>p-value</i>	< 0,001		

Les tests Chi², deux à deux, révèlent que le nombre des pertes est significativement plus grand de nuit que de jour par temps dégagé ($p = 0,01$), et que de jour par temps nuageux ($p < 0,001$). La condition de jour par temps nuageux comptabilisant également significativement moins de pertes d'information que de jour par temps dégagé ($p < 0,001$) (Figure 86).

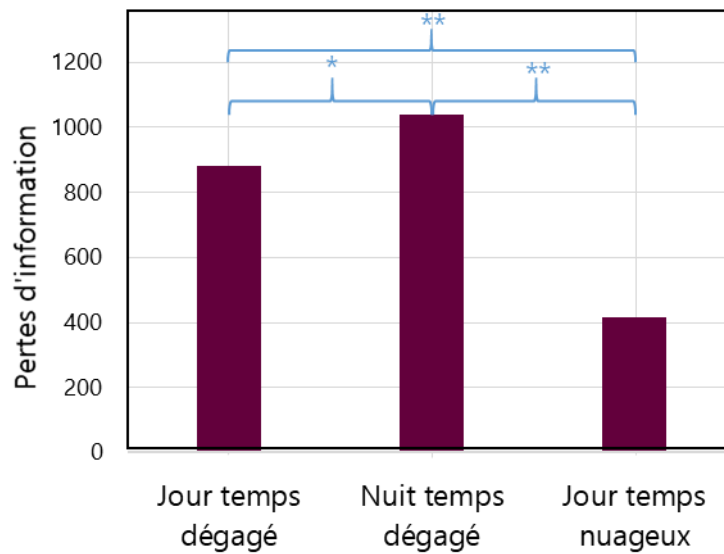


Figure 86 : Nombre de pertes d'information en fonction des conditions environnementales

Une différence significative entre deux conditions est représentée en bleu par une ($p < 0,05$) ou deux étoiles ($p < 0,01$).

Aucune interaction entre les conditions environnementales et les caractéristiques de la symbologie monoculaire n'a été révélée par les six tests Chi² (Tableau 17).

Tableau 18 : Tests Chi² sur le nombre de perte d'information selon les conditions environnementales en fonction des caractéristiques de la symbologie monoculaire

Perte d'information	Jour temps dégagé		Nuit temps dégagé		Jour temps nuageux	
	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans
Pulsation						
Nombre	443	437	509	531	224	193
Pourcentage	50,34 %	49,66 %	48,94 %	51,06 %	53,72 %	46,28 %
<i>p-value</i>	0,89		0,63		0,28	
Luminance						
Nombre	444	436	567	473	201	216
Pourcentage	50,45 %	49,55 %	54,52 %	45,48 %	48,20 %	51,80 %
<i>p-value</i>	0,85		0,03		0,60	

Il n'y a également pas d'interaction entre la pulsation et la luminance pour la variable perte d'information (Tableau 19).

Tableau 19 : Test Chi² sur le nombre de perte d'information en fonction des caractéristiques de la symbologie monoculaire

Perte d'information	Avec Pulsation	Sans pulsation
Luminance max	625	587
	26,74 %	25,12 %
Luminance min	551	574
	23,58 %	24,56 %
<i>p-value</i>	0,21	

L'évolution temporelle de la perte d'information au cours d'un essai a été mesurée. Les temps, auxquels les pertes d'information ont été signalées, ont été relevés et répartis selon six intervalles de temps de l'essai (Tableau 20). Il y a au total 2337 pertes d'information signalées par les 22 participants sur les 528 essais réalisés. Pour rappel, chaque essai durait 120 secondes.

Tableau 20 : Evaluation temporelle des pertes d'information

Perte d'information	0-20s	20s-40s	40s-60s	60s-80s	80s-100s	100s-120s
Nombre	78	189	283	454	625	708
Pourcentage	3,34 %	8,09 %	12,11 %	19,43 %	26,74 %	30,30 %
<i>p-value</i>	< 0,001					

Les pertes d'information ont été réparties selon les mêmes intervalles mais en fonction des conditions environnementales (Tableau 21).

Tableau 21 : Evaluation temporelle des pertes d'information en fonction des conditions environnementales

Jour temps dégagé						
Perte d'information	0-20s	20s-40s	40s-60s	60s-80s	80s-100s	100s-120s
Nombre	24	71	86	147	236	316
Pourcentage	2,73 %	8,07 %	9,77 %	16,70 %	26,82 %	35,91 %
<i>p-value</i>	< 0,001					
Nuit temps dégagé						
Perte d'information	0-20s	20s-40s	40s-60s	60s-80s	80s-100s	100s-120s
Nombre	49	93	152	235	282	229
Pourcentage	4,71 %	8,94 %	14,62%	22,60 %	27,12 %	22,02 %
<i>p-value</i>	< 0,001					
Jour temps nuageux						
Perte d'information	0-20s	20s-40s	40s-60s	60s-80s	80s-100s	100s-120s
Nombre	5	25	45	72	107	163
Pourcentage	1,20 %	6,00 %	10,79 %	17,27 %	25,66 %	39,09 %
<i>p-value</i>	< 0,001					

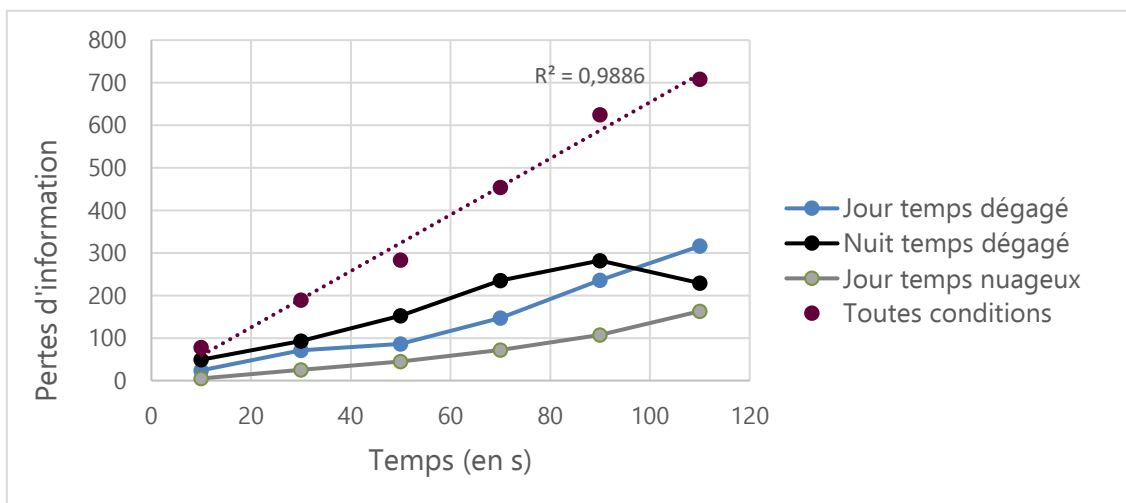


Figure 87 : Evolution temporelle des pertes d'information cumulées en fonction des conditions environnementales

La courbe de tendance en pointillés bleus et son coefficient de détermination sont représentés sur le graphique lorsque toutes les conditions environnementales sont considérées.

Ces résultats révèlent une augmentation linéaire des pertes d'information sur la durée totale de l'essai considérant toutes les conditions environnementales (Figure 87).

III.3.3.4. Sur le confort visuel

Concernant la fatigue visuelle et les symptômes, parmi l'ensemble des participants, aucun n'en a rapporté.

III.4. Discussion

L'objectif de cette troisième étude était d'évaluer les performances de suivi et de détection de cible ainsi que la perte d'information avec une image monoculaire superposée à un fond binoculaire dans une situation écologique. Il s'agissait de reproduire les conditions d'affichage à la fois de l'environnement et de la symbologie auxquelles les pilotes peuvent être soumis en vol.

Au travers l'utilisation du dispositif de réalité augmentée monoculaire semi-transparent, nous avons mesuré les variables suivantes : la performance de suivi d'une cible binoculaire par le déplacement du vecteur vitesse (FPV) de la symbologie monoculaire ; la détection d'événements monoculaires et binoculaires et le confort visuel. Toutes ces variables ont été mesurées en fonction de plusieurs conditions environnementales (fond binoculaire), avec une symbologie monoculaire ayant deux niveaux de contraste et dont une partie peut (ou non) stimuler l'attention exogène (par l'intermédiaire d'une pulsation du FPV). Cela a conduit à évaluer 12 conditions différentes avec la symbologie affichée sur chaque œil, soit 24 conditions au total.

III.4.1. Impact de l'œil de présentation

Toutes conditions confondues, nous avons testé les différences de performance lorsque l'image monoculaire était présentée sur l'œil droit et lorsqu'elle était présentée sur l'œil gauche.

Quelles que soient les conditions de fond, la perte d'information est significativement plus importante avec l'image monoculaire sur un œil que sur l'autre pour six des dix-neuf participants ayant signalé une perte (Tableau 14). La différence entre les deux yeux chez ces six participants est particulièrement importante dans la condition environnementale correspondant à un vol de jour par temps nuageux (Tableau 15). En effet, l'œil le moins bon endosse plus de 86% des pertes d'information sur cette condition. Les autres conditions conduisent à une différence de perte entre les deux yeux de l'ordre de 30 à 45 % (Tableau 14). Ces résultats suggèrent que trouver un moyen d'identifier à priori l'œil sur lequel mettre l'afficheur est nécessaire, notamment par temps nuageux et va donc dans le sens de

l'hypothèse de Cupero et al. (2009) qui stipulait qu'en conditions dégradées, la dominance oculaire pourrait avoir son importance.

Pour ce qui concerne l'impact de l'œil de présentation sur les performances, on observe que treize des vingt-deux participants ont réalisé la tâche de suivi avec plus de facilité lorsque l'image monoculaire était placée sur un œil que sur l'autre (Tableau 14). L'œil de présentation a également eu un impact sur les temps de détection qui ont été plus rapide avec un œil que sur l'autre pour sept des vingt-deux participants (Tableau 14). Il est à noter que parmi les 22 participants, seuls huit ont le même œil déterminé comme le meilleur par les trois variables (*i.e.* perte d'information, suivi et temps de détection). Cela signifie donc que pour 14 participants, l'œil déterminé comme le meilleur varie selon la variable considérée. Nous n'avions inclus que le test de sensibilité au flou comme test de dominance oculaire du fait des résultats de notre première étude mais il a été demandé sur quel œil les participants préféreraient l'image monoculaire après la réalisation des deux sessions (Tableau 16). Pour seulement treize participants, l'œil préféré reflète aussi l'œil pour lequel il y a eu moins de perte d'information et sur les huit participants pour lesquelles les variables jugeaient de manière unanime le meilleur œil, seulement cinq participants ont jugé cet œil comme le préféré (Tableau 16). Le choix subjectif des participants pour mettre l'image monoculaire semble indépendant de leurs performances aux différentes tâches demandées. Alors que le test de sensibilité au flou prédisait le meilleur œil de 87,5 % des participants présentant un effet de l'œil dans l'étude I, dans cette troisième étude, c'est le cas pour 45,5 % (Tableau 16).

On retiendra de nos résultats que si l'on souhaite se baser sur des données objectives pour choisir l'œil sur lequel afficher l'image monoculaire, il conviendra alors de déterminer si l'une des variables est à privilégier dans le contexte de l'aéronautique.

III.4.2. Effets de la réalité augmentée monoculaire sur la perception et les performances de pilotage

Comme l'ont évoqué certains auteurs sans la mesurer (Behar et al., 1990 ; Hershberger et Guerin, 1975 ; Rash et al., 2009), l'utilisation d'un système de réalité augmentée monoculaire génère de la suppression. Le Tableau 20 évaluant ces pertes d'information en fonction du temps où elles sont le plus recensées révèle que ces pertes augmentent au fil de l'essai. Or, plus le temps passe pendant l'essai, la simulation étant dynamique, plus on se rapproche de la piste. Il y a alors plus de mouvements rapides sur la rétine. L'effet de la dynamique de la scène a été étudiée par Laramé et Ware (2002) et Winterbottom et al. (2015). Laramé & Ware (2002) observent que le temps de détection d'évènements est plus important avec une scène dynamique (6,99 s) qu'avec une scène statique (3,85 s) tandis que Winterbottom et al. (2015) n'ont pas trouvé d'impact de la dynamique de la scène. Dans ces deux études, l'étude de la dynamique portait sur la détection d'évènement et non sur la perte d'information. Dans notre étude, il n'y a pas assez d'évènements pour espérer voir une

évolution du temps de détection au cours de l'essai, mais l'augmentation du temps de détection observé Laramé et Ware (2002) dénote un déclin de la performance qui est en cohérence avec une augmentation de la perte d'information. Ainsi, il semble légitime de penser que l'augmentation des pertes d'information au cours de l'essai peut être imputé, au moins en partie, à l'augmentation de la dynamique de la scène. Cette augmentation des pertes d'information au cours du temps pourrait également être due à la taille de la piste qui augmente, plus on se rapproche d'elle. En effet, la force du stimulus qu'est la piste augmente et provoque donc davantage de rivalité. O'Shea et al. (1997) rapportent une augmentation du taux d'alternance avec des stimuli de grande tailles. Dans notre étude, il n'a pas été observé d'alternance mais uniquement des suppressions du vecteur vitesse (FPV). Il est possible que les participants n'aient pas noté la perte d'information liée à une éventuelle alternance du fait de la tâche qui consistait à aligner ensemble deux éléments de la symbologie (*i.e.* le FPV et le FD). Ainsi, les participants n'avaient pas à porter une attention accrue à l'environnement, ce qui pourrait expliquer pourquoi ils n'ont pas été en mesure de signaler des pertes de ce dernier. Bien que les pertes augmentent au cours du temps, la performance de suivi n'est pas diminuée au cours de l'essai (Annexe 6). Le suivi n'est donc, à priori, pas impacté par l'augmentation des suppressions du FPV qui est pourtant un élément déterminant de la tâche de suivi. Ce maintien des performances suggère des suppressions de suffisamment courtes durées ou d'une partie limitée du FPV et non la totalité pour ne pas impacter le suivi de cible.

Outre l'évolution temporelle du nombre de pertes d'information, on a pu observer que les pertes n'étaient pas de la même ampleur selon les conditions. La condition de nuit répertorie le plus de pertes, suivi de la condition de jour par temps dégagé. La condition de jour par temps nuageux est celle qui répertorie le moins de perte du vecteur vitesse (Tableau 17). L'évolution de ces pertes au cours de l'essai varie également selon les conditions. Ainsi, on constate une augmentation plus rapide des pertes pour la condition de nuit avant une quasi-stagnation. L'effet des conditions environnementales est discuté au paragraphe III.4.3.

On retiendra que le nombre de pertes d'information est proportionnel à la durée de l'exposition. Cela est probablement dû à l'augmentation progressive de la dynamique de la scène et de la taille des éléments du fond binoculaire sur la rétine tout au long de l'exposition. L'augmentation des pertes ne s'est toutefois pas accompagné par un déclin des autres performances évaluées.

On notera également que malgré les pertes d'informations, l'expérimentation en réalité augmentée monoculaire n'a donné lieu à aucun signe de fatigue visuelle. La tolérance à ce système est donc bonne même après une exposition cumulée d'une heure.

III.4.3. Influence des conditions environnementales

Les conditions environnementales influent grandement sur la complexité de la tâche de pilotage de manière générale. A notre niveau, nous avons pu constater qu'elle influe

également le nombre de pertes d'information. Ceci se reflète par une part plus importante de pertes du vecteur vitesse (FPV) en simulation de vol de nuit par temps dégagé par rapport aux conditions de vol de jour (Figure 86). De jour, les pertes ont été moins importantes par temps nuageux que par temps dégagé. Ainsi, c'est la condition de jour par temps nuageux qui semble le mieux limiter la perte d'information. C'est aussi cette condition qui conduit à une meilleure performance de suivi de cible et une tendance à un temps moyen de détection plus faible. Nos résultats vont à l'encontre de l'étude d'Hershberger et Guérin (1975) qui ne relevait aucune différence significative sur la performance de suivi en changeant les caractéristiques du fond binoculaire. Nos résultats pourraient s'expliquer par le contraste induit entre le fond binoculaire et la symbologie. En effet, il est établi que c'est la stéréopsie qui domine lorsque le niveau de contraste entre les images est faible mais que c'est la rivalité qui domine lorsqu'il est élevé (Blake, Yang, et Wilson, 1991). Ainsi, la condition de jour par temps nuageux pourrait être la condition créant le moins de contraste avec la symbologie tandis que la condition de nuit serait celle exacerbant le plus ce contraste. L'implication des niveaux lumineux du fond et de la symbologie est confirmée par les résultats obtenus pour les temps de détection qui se révèlent grandement améliorés de nuit lorsque la luminance de la symbologie est diminuée. En effet, avec une luminance de la symbologie abaissée de nuit, la rivalité sera moins grande mais il sera aussi plus facile de détecter un warning ponctuel ayant une luminance élevée puisque lorsque deux images diffèrent en termes de contraste, celle qui présente un contraste plus élevé domine (Blake et Camisa, 1978 ; Levelt, 1965).

On retiendra de nos résultats que les conditions environnementales ne sont pas toutes traitées avec la même facilité en réalité augmentée monoculaire et que parmi les trois conditions testées dans cette étude, la condition la plus critique est celle de nuit par temps dégagé.

III.4.4. Influence des caractéristiques d'affichage

Alors que nous avons identifié un effet des conditions environnementales que l'étude de Hershberger et Guérin (1975) n'avait pas pu mettre en évidence, nos résultats concernant les caractéristiques de la symbologie monoculaire sont en accord avec eux. En effet, pour la performance de suivi, la pulsation n'a ni améliorée ni dégradée les performances de suivi tout comme le changement de luminance. Toutefois, pour la condition de nuit et temps dégagé, il semble que limiter le niveau de luminance de la symbologie soit bénéfique au moins pour assurer une détection efficace d'évènements pendant l'exposition.

On retiendra de nos résultats que dans une situation se voulant plus écologique, nos modulations des caractéristiques de l'affichage ont eu peu d'impact sur les effets de la réalité augmentée monoculaire sur la perception et les performances des participants. On préconisera toutefois, de limiter la luminance de la symbologie en vol de nuit.

Discussion générale et perspectives

I. Introduction

Solution technologique pouvant améliorer la perception des pilotes tout en gardant les informations visuelles devant les yeux à moindre coût et en économisant de l'espace, les systèmes de réalité augmentée monoculaires essayent de s'imposer dans l'aviation civile. Les visuels de casque monoculaires tels que le TopMax®, qui peuvent se suppléer aux affichages tête haute, doivent être des outils qui augmentent la vision du pilote sans générer de contraintes rédhibitoires.

La stimulation particulière qu'ils induisent provoque, selon certains retours de pilotes, des contraintes visuelles telles que de la fatigue visuelle, des maux de tête et des baisses de performances (Behar et al., 1990 ; Capo-Aponte et al., 2009 ; Rash et al., 2009). La perception résultante de ce type de dispositif est difficile à caractériser puisqu'elle se trouve à la frontière entre la fusion et la rivalité binoculaire. Le fond binoculaire sollicite la fusion binoculaire alors que l'image monoculaire d'un œil rivalise avec les points correspondants de l'image de l'autre œil.

L'objectif de ce travail de thèse était d'évaluer comment les caractéristiques des stimuli visuels influent sur la performance et le confort visuel des utilisateurs de système de réalité augmentée monoculaire. Du fait du conflit entre les deux yeux dans la zone de l'image monoculaire, nous avons également évalué si des suppressions étaient perçues et si elles dépendaient aussi des caractéristiques des stimuli visuels.

Du fait de la présentation de la symbologie sur un œil, ce travail de thèse avait également pour objectif de lever l'incertitude quant à l'effet de l'œil de présentation de l'image monoculaire sur les performances et le confort visuel.

II. Synthèse des résultats des trois études

Notre première étude consistait à évaluer trois de nos hypothèses avec une approche psychophysique à l'aide d'un dispositif reproduisant les contraintes des systèmes de réalité augmentée monoculaire à savoir, une image monoculaire superposée à un fond binoculaire. Dans cette étude, il s'agissait tout d'abord de déterminer si les caractéristiques du fond binoculaire et de l'image monoculaire influencent les performances en réalité augmentée monoculaire tout comme les caractéristiques des stimuli influencent la dynamique de la rivalité binoculaire avec deux images dichoptiques. Ensuite, nous avons évalué l'impact de la dominance oculaire motrice, d'acuité et sensorielle sur les performances. Enfin, nous avons

évalué si l'attention exogène permet d'améliorer les performances et donc par extension, de diminuer la rivalité binoculaire.

La deuxième étude s'intéressait plus particulièrement à ce dernier versant de l'étude I et à la détermination d'un profil de pulsation capable d'améliorer les performances. Des modifications méthodologiques ont été apportées au vu de certains résultats et observations de l'étude I. L'hypothèse quant à l'impact de l'attention exogène était évaluée dans cette étude.

Notre troisième étude consistait à tester les hypothèses précédentes de façon plus écologique et en lien avec le domaine d'application de cette thèse.

Un tableau de synthèse des trois études est disponible en Annexe 7.

Evoquons tout d'abord, l'impact des caractéristiques du fond des trois études. Les caractéristiques du fond binoculaire se sont avérées avoir un impact sur la performance de suivi dans l'étude I et III. Dans la première étude, la performance de suivi est meilleure en hautes fréquences spatiales plutôt qu'en basses et également meilleure avec un contraste 100 % qu'avec un contraste de 20 % (Figure 49). Dans l'étude III, la performance de suivi est meilleure en condition de temps nuageux que par temps dégagé de jour comme de nuit (Figure 84). Ces deux études suggèrent que **le fond binoculaire impacte la performance de suivi d'une cible**. Toutefois, on notera que ces résultats n'ont pas été observés pour la deuxième étude, dont la méthode est pourtant très proche de la première. Le faible échantillon dans cette étude peut expliquer un manque de puissance. Les résultats observés pour l'étude III, la plus écologique, ont **été expliqués par le contraste induit entre le fond binoculaire et la symbologie**. En effet, Blake et al. (1991) montrent que lorsque le niveau de contraste entre les images est faible, c'est la fusion qui domine. Ainsi, la condition par temps nuageux serait celle limitant le plus ce contraste. L'effet délétère des conditions par temps dégagé, et donc du contraste fort avec la symbologie, sur la rivalité est confirmé par les résultats obtenus pour les pertes d'information. En effet, dans ces conditions les pertes sont significativement plus grandes qu'en condition de jour par temps nuageux (Figure 86).

Les caractéristiques du fond binoculaire ont également un effet sur les temps de détection. Dans la première étude, **la détection est plus rapide en basses fréquences à 20 et 60 % de contraste qu'à 100 %** de contraste en hautes ou basses fréquences (Figure 51). Ce résultat a été confirmé dans la deuxième étude (Figure 70). Dans la troisième étude, les temps de détection ne sont pas influencés seulement par les caractéristiques du fond mais aussi par le niveau de luminance de la symbologie. En effet, **pour la condition de nuit par temps dégagé**, la symbologie en luminance maximale allonge les temps de détection tandis que **la luminance minimale permet d'abaisser significativement le temps de détection d'un évènement** (Figure 85). La luminance minimale est **aussi celle avec laquelle les pertes d'information de nuit sont les moins nombreuses** (45 % en luminance minimale contre 55 % en luminance maximale) (Tableau 18). Il semble donc particulièrement important de considérer l'ajustement de la luminance de la symbologie dans la condition de nuit par temps dégagé.

Quelles que soient les études, les évènements à détecter sont des éléments très contrastés. Il semble cohérent qu'il soit plus facile, et donc que les participants soient plus rapides à détecter un élément contrasté lorsqu'il apparaît dans un environnement peu contrasté.

Les temps de fixation évalués dans l'étude I montrent également un effet des caractéristiques du fond binoculaire (Figure 52). Le temps de fixation de l'évènement est plus court en basses fréquences spatiales plutôt qu'en hautes et est également meilleure avec un contraste de 20 % qu'avec un contraste de 100 %. Ainsi, **la détection est non seulement plus rapide mais aussi plus efficace (durée plus courte de fixation) en faible contraste.** Cet **effet**, qui suggère une meilleure efficacité pour la gestion des évènements à faible contraste, est **opposé à celui qui avait pu être observé pour le suivi de cible.** Ainsi, il semble qu'un fort contraste profite plutôt à la tâche de suivi de cible, tandis qu'un faible contraste profiterait à la détection et à l'identification des évènements.

Le fond impacte les résultats sur les différentes variables. Il a été choisi d'évaluer différentes caractéristiques de la symbologie monoculaire (contraste/luminance et pulsation) afin de déterminer si le paramétrage de cet élément avait une influence sur les variables étudiées.

Les caractéristiques de la symbologie monoculaire se sont avérées avoir un impact sur le suivi de cible dans les études I et II. En effet, on observe dans l'étude I que **le suivi est meilleur sans pulsation** de la symbologie qu'avec (Figure 50). L'écart entre sans et avec est de 0,19 minutes d'arc. Cet effet statistique n'est **pas retrouvé dans l'étude II** lorsque sont comparés les résultats sans pulsation et avec le profil 1 (semblable à celui de l'étude I sauf pour le contraste maximal qui ne descend qu'à 0,7 au lieu de 0) ou le profil 2 (semblable au profil 1 mais sans surépaisseur) (Figure 68). Pourtant, la différence entre sans et avec est de 0,27 minutes d'arc en profil 1 et 0,20 minutes d'arc avec le profil 2. Le faible échantillon associé à la plus grande variabilité des données (quasiment quatre fois plus grande) dans cette étude peut expliquer un manque de puissance. Dans l'étude II, seul le profil 3 (avec des phases de variation de contraste étendues) semble délétère au suivi de cible. **Dans l'étude III, aucun effet de la pulsation de la symbologie monoculaire n'est observé pour le suivi de cible.** Pour autant, bien que certains effets soient significatifs dans les études I et II, on notera que **la différence d'erreur de suivi entre sans et avec reste très faible** (autour de 0,20 minutes d'arc) sur des erreurs allant de 10,33 à 15,78 minutes d'arc (le profil 3, trop délétère, n'est pas considéré dans les valeurs mentionnées).

Si la pulsation n'a pas profité aux résultats de la tâche de suivi de cible, **il semble que le contraste de la symbologie ait eu un impact mais ce, uniquement dans l'étude II.** Dans cette étude, la performance de suivi de cible est meilleure lorsque la symbologie a un contraste de 1 (Figure 69). L'absence d'effet dans l'étude I peut sans doute s'expliquer par la présence d'un biais au contraste 1. En effet, dans la première étude, **la pulsation associée à un contraste de 1 conduisait à ce que la symbologie disparaissait momentanément.** Cette disparition a probablement eu un effet délétère sur le suivi de la cible limitant ainsi la

performance à ce niveau de contraste lorsque toutes conditions sont confondues. Le contraste élevé de la symbologie permet de la rendre dominante (Hershberger et Guerin, 1975) ce qui facilite la tâche de suivi de cible qui repose principalement sur cette dernière.

Les caractéristiques de la symbologie monoculaire ont également un impact sur les variables associées à la détection des événements (temps de détection, temps de fixation et latence). Ainsi, l'étude I révèle des interactions complexes entre les caractéristiques de la symbologie monoculaire mais aussi celles du fond. Ainsi, en hautes fréquences et 100 % de contraste, les événements sont détectés de manière plus efficace quand la symbologie a un contraste maximal de 0,6 qui peut ou non être pulsée. Si toutefois, le contraste venait à être mis à 1, alors il convient de ne pas faire pulser la symbologie (Tableau 6). En BF-100 %, la performance globale est meilleure avec une symbologie à un contraste maximal de 0,6 pulsée (Tableau 7). Pour la condition BF-60 %, la performance est maintenue avec une symbologie monoculaire de contraste maximal 1 pulsée. Elle est également maintenue à contraste maximal 0,6 non pulsée (Tableau 8). Enfin, pour la condition BF-20 %, la performance est maintenue avec une symbologie monoculaire à contraste maximal 1 et non pulsée. Elle est également maintenue avec une symbologie monoculaire de contraste maximal 0,6 pulsée (Tableau 9). **Etant donné le biais associé au contraste 1 avec pulsation dans cette étude, il ne semble pas très opportun de s'étendre sur son impact.** Il conviendrait de refaire l'étude de ces variables à contraste 1 avec une pulsation de la symbologie semblable au profil 2 (profil optimisant le plus le temps de détection tout en limitant l'erreur à la cible) de l'étude II. Si on considère le contraste 0,6, il semble qu'il faille que la symbologie pulse en BF-20 % et BF-100 %, et elle peut également le faire en HF-100 % mais il convient de ne pas la faire pulser en BF-60 %. **L'intérêt d'avoir une symbologie à un contraste de 0,6 plutôt qu'à 1 pour la détection d'évènements** réside probablement dans le fait que cela permet de **limiter la dominance de la symbologie au profit de celle des évènements** (Hershberger et Guerin, 1975 ; Winterbottom et al., 2015). **La pulsation jouerait globalement le même rôle, que le contraste, sur la limitation de la dominance de la symbologie au profit de celle des évènements.** Il a notamment été montré récemment par Naber et al. (2020) qu'à la présentation de stimuli dichoptiques, des changements brusques de contraste d'un des stimuli sollicitent l'attention exogène conduisant à plus de perception mixte et donc moins de suppression. Dans l'étude III, **l'effet des caractéristiques de la symbologie sur la détection des évènements se limite à la condition de nuit** pour laquelle il convient, là encore, de limiter le niveau de luminance de la symbologie.

Ainsi, on observe des **effets contradictoires**. Alors que le **suivi de cible** suggère plutôt un contraste de la **symbologie à 1**, dont il conviendrait d'évaluer l'effet associé à la pulsation de profil 2, les variables liées à l'apparition des **évènements** suggèrent plutôt d'afficher la **symbologie avec un contraste limité à 0,6 et pulsée**. Il conviendrait alors de **définir la tâche la plus importante** dans le contexte d'utilisation du système de réalité augmentée monoculaire **pour déterminer comment le niveau de contraste/luminance,**

avec ou sans pulsation, de la symbologie doit être paramétré. On notera qu'en condition plus écologique, ces paramètres ne semblent avoir un effet majeur que dans de rares cas. Il conviendra d'étudier une plus grande variabilité de conditions environnementales pour déterminer si d'autres conditions que celle de nuit par temps dégagé nécessitent un paramétrage spécifique.

On retiendra que **la tâche de suivi de cible est mieux réalisée lorsque le contraste entre la symbologie et le fond est le plus faible pour assurer la fusion** (étude I : HF-100 % et étude III : par temps nuageux de jour) et plutôt avec une symbologie à contraste 1 (étude II) non pulsée (étude I), tandis que **la détection d'évènements est plus efficace lorsque le fond est en basses fréquences spatiales** (étude I : temps de détection) **et peu contrasté** (étude I et II) **avec une symbologie à contraste limité** (étude I et étude III pour la condition de nuit) **et pulsée** (étude I). Il semble donc clairement y avoir une dichotomie entre les deux tâches qui prospèrent avec des caractéristiques visuelles opposées.

Parmi les autres résultats, celui qui est commun aux trois études, c'est **l'absence de fatigue visuelle subjective et de symptômes** rapportés par les participants. Si on peut se féliciter de l'innocuité apparente d'un conflit interoculaire du type de celui engendré par un système de réalité augmentée monoculaire semi-transparent, il se pourrait que la faible durée d'exposition des participants à ce conflit puisse expliquer ces résultats. En effet, chaque essai, quelle que soit l'étude, avait une durée d'environ 120 secondes. Cette durée n'était sans doute pas assez longue pour générer de la fatigue visuelle perçue par les participants. Les études évaluant le confort visuel avec un visuel de casque ont rapporté des symptômes après deux à trois heures de vol (Behar et al., 1990 ; Rash et al., 2009). La durée totale d'un essai de l'étude de Winterbottom et al. (2006 ; 2015) était de plus de 160 secondes en fonction de la durée des évènements qui est aléatoire. La durée d'un essai de Hershberger et Guerin (1975) est de 60 secondes. Dans ces deux études, le confort visuel n'avait pas été évalué. Dans nos études, même avec un temps cumulé de plus de 30 minutes par session pour l'étude I, on reste loin d'une exposition de longue durée, d'autant que chaque essai était espacé d'un temps de pause permettant de charger l'essai suivant et de faire la calibration de l'oculomètre. Toutefois, cette durée d'exposition correspond à celle envisagée pour l'utilisation du dispositif de réalité augmentée monoculaire semi-transparent associé à cette thèse. **Le système préserve donc le confort des utilisateurs tout au long de leur utilisation.**

Des données objectives sur la fatigue visuelle auraient peut-être permis de mettre en évidence des signes précoces de la fatigue, notamment l'évaluation des clignements obtenus avec l'oculomètre de l'étude I.

L'impact de l'œil de présentation est différent en fonction des études. Alors que dans la première, l'effet de l'œil de présentation ne s'est retrouvé, au maximum, que chez 28 % des participants (Tableau 4). Dans la troisième, plus de 77 % des participants ont au moins un œil avec lequel ils sont meilleurs sur une variable (Tableau 14). Cette différence s'explique

probablement par les différences entre les deux études. En effet, l'étude I semble induire peu de rivalité binoculaire (peu de pertes visuelles) tandis que l'étude III, qui se compose d'un environnement complexe coloré avec du contenu sémantique et d'une symbologie de vol exhaustive, induit des pertes d'informations. Dans cette étude, l'intérêt d'un œil dominant est amplifié par la complexité de l'exposition. L'étude I semblait identifier un test de dominance permettant de détecter l'œil sur lequel privilégier l'information monoculaire. Dans l'étude III, les résultats au test de sensibilité au flou ne sont pas si unanimes pour prédire les performances des participants selon l'œil d'affichage de l'information monoculaire. Il se peut que cela tienne au fait que dans l'étude III, c'est la tâche de suivi qui aboutit massivement à une différence entre les yeux. Or, cette tâche est probablement celle ayant le plus de composante motrice ce qui pourrait être mal prédit avec le test sensoriel de sensibilité au flou. On peut ainsi penser que la **dominance oculaire motrice est à considérer lors de la tâche de performance de suivi** qui s'apparente à de la visée de cible. Ainsi, il conviendrait d'ajouter un test moteur à l'étude III. A contrario, **le test de sensibilité au flou semble pertinent pour identifier l'œil sur lequel l'afficheur doit être placé pour minimiser les pertes d'informations** (sur les 3 participants ayant eu un œil avec moins de pertes et ayant pu être évalués par le test de sensibilité au flou, tous ont été concordants). Il conviendra d'augmenter la taille de l'échantillon pour vérifier cette tendance.

III. Limites des études menées

Il est difficile de faire la corrélation des résultats étant donné les différences des stimulations dans études I ou II et III. Alors que dans les premières sont projetées des stimulations simples qui sollicitent un traitement de bas niveau puisque caractérisées en termes de contraste, d'orientation, de direction et de vitesse. L'étude III sollicite un traitement de plus haut niveau du fait de la reconnaissance et la catégorisation à la fois de la symbologie et de la scène binoculaire qui contiennent des informations plus complexes soumises à interprétation. Ainsi, la stimulation proposée dans les études I et II se rapprochent de celle proposée par Blake et Boothroyd (1985) dans laquelle, comme dans nos deux premières études, il n'y a pas de suppression expérimentée.

La cible attachée au fond binoculaire dans la première étude avait une taille constante ($2,1^\circ$) alors que dans l'étude III, bien que la cible soit monoculaire (FD), la piste réelle augmentait au cours du temps. Elle occupait alors une plus grande surface sur la rétine que la symbologie monoculaire à mesure de l'essai, et le conflit se résoudrait par une alternance entre le FPV et la piste. Les participants ayant signalés de plus en plus de perte d'information au fil de l'essai.

De plus, la taille de l'image monoculaire en conflit, entre les études, n'est pas la même. Dans la première, elle se résume à la taille de l'anneau monoculaire alors que dans la troisième, c'est toute la symbologie qui crée un conflit plus important.

Alors qu'en condition de vol, la piste synthétique augmente de taille proportionnellement à l'agrandissement de la piste réelle, dans notre étude, nous n'avons pas pu ajuster la taille de la piste synthétique. De ce fait, alors que les contours des deux étaient confondus en début d'essai, et donc fusionnables, ce n'était plus le cas à mesure de l'essai (Figure 88). Ainsi, comme évoqué dans l'état de l'art (Blake, Yang, et Wilson, 1991), plus le conflit est important entre l'image monoculaire et le fond et donc moins il y a de correspondance, plus la résolution se fera par l'alternance des deux images. Ceci pourrait expliquer également le nombre de pertes d'information visuelle notable dans cette étude progressant linéairement avec la durée de l'essai.



Figure 88 : Piste réelle et piste synthétique en début (gauche) et en fin d'essai (droite)

IV. Apports des travaux au cadre théorique

La fusion de deux images est un phénomène complexe dont le traitement atteint plusieurs zones du cortex visuel et des aires plus profondes. Lorsqu'est présenté une image monoculaire sur un fond binoculaire, les images sont fusionnables mais cette fusion est instable, elle peut diminuer les performances et dans certains cas où cette fusion n'opère plus, provoquer de la rivalité binoculaire c'est-à-dire une suppression d'une partie ou de la totalité de l'image.

La vision binoculaire qui résulte de deux images qui sont fusionnables mais où un conflit localisé peut être créé par la différence d'une partie de ces deux images n'est pas bien définie dans la littérature. Elle prête d'ailleurs à confusion lorsque l'on parle de visuels de casque monoculaires puisque les différents chercheurs s'étant penchés sur le sujet ont cherché à évaluer la rivalité binoculaire alors que la fusion est bien plus présente mais altérée.

Ainsi, la rivalité binoculaire résulte par une alternance entre deux images dichoptiques. La fusion binoculaire résulte d'une perception simple du conflit entre deux images fusionnables. La présentation d'une image monoculaire superposée au fond binoculaire pourrait s'apparenter à de la fusion anormale comme celle expérimentée par deux images dichoptiques avant l'alternance (Wolfe, 1983). Les deux images sont superposées et leur perception ne s'apparente ni à la fusion binoculaire ni à la rivalité binoculaire et induit des performances également dépendantes des caractéristiques des

stimuli visuels. Ainsi, comme pour les images dichoptiques, si la force d'un des deux stimulus est trop importante par rapport à l'autre, en résultera une alternance.

V. Apports des travaux au cadre industriel

Les objectifs de la thèse se sont construits en lien avec les interrogations industrielles. Nous pouvons donner certaines réponses et susciter de nouvelles questions à travers les recherches effectuées. L'objectif principal étant d'évaluer les contraintes liées aux visuels de casque afin de chercher à optimiser leur utilisation.

Comme nous en avons émis l'hypothèse, **les performances sont dépendantes des stimulations**. Elles dépendent à la fois des conditions environnementales et de la symbologie. Etant donné qu'on ne peut maîtriser l'environnement, **il est nécessaire d'envisager une symbologie adaptative** qui ne peut se résumer au changement de luminance que font les pilotes.

Les travaux de thèse montrent que pour certaines conditions environnementales spécifiques, il est **nécessaire d'imposer des minimas et maximas pour la luminance de la symbologie** afin de préserver au mieux les performances.

Par ailleurs, **la pulsation d'une partie de la symbologie semble un paramètre déterminant pour la détection d'évènements tels que des warnings**. Ainsi, la pulsation du FPV permettrait de limiter la focalisation attentionnelle et serait pertinente en association avec l'apparition des évènements. Une étude de profil de pulsation avec un simulateur plus fidèle que celui que nous avons utilisé ou en vol permettrait de mieux rendre compte de son intérêt.

Les pertes observées en simulateur peuvent être limitées en maîtrisant l'œil sur lequel est installé l'afficheur monoculaire. Cet œil peut être identifié empiriquement avec une phase de test mais semble aussi pouvoir être **identifié à l'aide d'un test de dominance oculaire dit de sensibilité au flou**. Il conviendra de tester l'apport de ce positionnement sur le long terme étant donné que comme montré par Browne et al. (2010) pour un test moteur uniquement, après six jours, les différences entre les performances réalisées avec l'œil dominant et celles réalisées avec l'œil non-dominant se resserrent.

Nos travaux ont montré le **fort impact d'une symbologie non conforme sur la suppression de l'image monoculaire**. Il est donc important de veiller à la parfaite cohérence des éléments monoculaires avec la scène binoculaire en vol. Si la piste synthétique n'est pas conforme à la piste réelle, la différence entre les deux images sera trop importante et génèrera de la rivalité binoculaire.

On retiendra également que **le système n'a généré aucun signe d'inconfort ou de fatigue visuelle** malgré un temps cumulé d'exposition proche de celui auquel est destiné le système de réalité augmentée semi-transparent monoculaire.

Conclusion

Les systèmes de réalité augmentée semi-transparents monoculaires génèrent une perception qui n'est pas naturelle étant donnée la projection d'une image virtuelle monoculaire superposée à une scène réelle binoculaire. Pour servir de dispositif d'aide à la vision efficace, il doit être le plus fiable possible et ne pas créer de contraintes visuelles rédhibitoires pour les utilisateurs et notamment les pilotes. La contrainte la plus connue que peuvent impliquer ces dispositifs est la rivalité binoculaire du fait de la projection d'images différentes à des régions rétiniennes correspondantes des deux yeux. Étant donné que la rivalité binoculaire peut provoquer de la suppression, ce qui peut être problématique pour la tâche de pilotage ou nuire aux performances, il est nécessaire de comprendre comment la rivalité binoculaire opère. L'impact de la rivalité binoculaire sur les performances des opérateurs munis de ces systèmes doit donc être minimisé.

A travers une revue de littérature à la fois sur le phénomène de fusion binoculaire et de rivalité binoculaire, nous avons vu que la perception générée par les systèmes de réalité augmentée se trouve finalement entre les deux. Étant donné l'impact des caractéristiques visuelles que ce soit lors de la présentation de deux images fusionnables ou de deux images dichoptiques, la question se pose quant à cet impact sur les performances en condition de réalité augmentée monoculaire.

Par le biais de deux études psychophysiques et une étude écologique, l'enjeu de ce travail de thèse était de mesurer l'influence des caractéristiques visuelles sur les performances. Nous avons donc évalué comment les caractéristiques du fond binoculaire et de l'image monoculaire ainsi que l'œil de présentation et l'attention exogène influent sur les performances et le confort visuel.

Alors que les deux premières études généraient un faible conflit entre l'image monoculaire et le fond binoculaire, notre troisième étude a permis de rendre compte du phénomène de rivalité étant donné le plus grand nombre de pertes du FPV. Comme évoqué dans la littérature, c'est la cohérence des deux images qui favorisent la fusion et plus il y a d'incohérence, plus on se dirige vers la présentation d'images dichoptiques menant à l'alternance des deux images.

La plupart des études présentées dans l'état de l'art évaluaient l'utilisation des visuels de casque sans inclure de mesure de la performance de suivi de cible dans leur méthodologie. Nous avons choisi de la considérer dans nos études étant donné qu'il s'agit de la tâche principale en phase d'approche notamment. Il s'avère que les caractéristiques visuelles qui impactent cette tâche, impactent différemment la tâche de détection de cible. Nos différentes mesures de performance couplées au grand panel de stimulations que nous avons évaluées apportent un complément aux études sur les visuels de casque monoculaires.

Tout comme la fusion ou la rivalité binoculaire, la perception en réalité augmentée monoculaire dépend fortement des stimulations. Etant donné que l'environnement n'est pas contrôlable, l'adaptation d'une symbologie à cet environnement est la clé pour minimiser l'impact du conflit sur les performances.

Références

- Abraham N. G., Srinivasan K., Thomas J. « Normative data for near point of convergence, accommodation, and phoria ». *Oman J Ophthalmol.* 2015. Vol. 8, n°1, p. 14-18.
- Alais D., Blake R. « Grouping visual features during binocular rivalry ». *Vision Res.* 1999. Vol. 39, n°26, p. 4341-4353.
- Alais D., O'Shea R. P., Mesana-Alais C., Wilson I. G. « On Binocular Alternation ». *Perception.* 2000. Vol. 29, n°12, p. 1437-1445.
- Arbak C. J. « Utility Evaluation Of A Helmet-Mounted Display And Sight ». In : *Helmet-Mounted Displays. Helmet-Mounted Displays.* [International Society for Optics and Photonics, 1989. p. 138-141.
- Arditi A., Kaufman L., Movshon J. A. « A simple explanation of the induced size effect ». *Vis. Res.* 1981. Vol. 21, n°6, p. 755-764.
- Babbitt B., Nystrom C. O. « Questionnaire Construction Manual Annex. Questionnaires: Literature Survey and Bibliography ». 1989.
- Behar I., Wiley R. W., Levine R. R., Rash C. E., Walsh D. J. *Visual survey of Apache aviators (VISAA).* Fort Rucker, AL : United States Army Aeromedical Research Laboratory, 1990.
- Berner G. E., Berner D. E. « Relation of ocular dominance, handedness, and the controlling eye in binocular vision ». *A.M.A archives of ophthalmology.* 1953. Vol. 50, n°5, p. 603-608.
- Blake R. « Landmarks in the History of Binocular Rivalry ». In : *Binocular Rivalry.* Cambridge, UK : MIT Press, 1998. p. 1-27.
- Blake R. « A neural theory of binocular rivalry ». *Psychol. Rev.* 1989. Vol. 96, n°1, p. 145.
- Blake R., Boothroyd K. « The precedence of binocular fusion over binocular rivalry ». *Perception & Psychophysics.* 1985. Vol. 37, n°2, p. 114-124.
- Blake R., Camisa J. « Is binocular vision always monocular? ». *Science.* 1978. Vol. 200, n°4349, p. 1497-1499.
- Blake R., Fox R. « Binocular rivalry suppression: Insensitive to spatial frequency and orientation change ». *Vis. Res.* 1974. Vol. 14, n°8, p. 687-692.
- Blake R., Logothetis N. K. « Visual competition ». *Nat. Rev. Neurosci.* 2002. Vol. 3, n°1, p. 13-21.
- Blake R., O'Shea R. P. « Binocular Rivalry ». In : *Reference Module in Neuroscience and Biobehavioral Psychology.* Elsevier, 2017.

- Blake R., O'Shea R. P., Mueller T. J. « Spatial zones of binocular rivalry in central and peripheral vision ». *Vis. Neurosci.* 1992. Vol. 8, n°5, p. 469-478.
- Blake R., Westendorf D. H., Overton R. « What is suppressed during binocular rivalry? ». *Perception.* 1980. Vol. 9, n°2, p. 223-231.
- Blake R., Yang Y., Wilson H. R. « On the coexistence of stereopsis and binocular rivalry ». *Vis. Res.* 1991. Vol. 31, n°7, p. 1191-1203.
- Blake R., Yu K., Lokey M., Norman H. « Binocular Rivalry and Motion Perception ». *J. Cogn. Neurosci.* 1998. Vol. 10, n°1, p. 46-60.
- Borrelli A., Hon G., Zik Y. *The Optics of Giambattista Della Porta (ca. 1535–1615): A Reassessment.* Springer. Springer International Publishing, 2017. (Archimedes).
- Bourassa D. C. « Handedness and Eye-dominance: A Meta-analysis of Their Relationship ». *Brain Cogn.* 1996. Vol. 1, n°1, p. 5-34.
- Brascamp J. W., Blake R. « Inattention Abolishes Binocular Rivalry: Perceptual Evidence ». *Psychol. Sci.* 2012. Vol. 23, n°10, p. 1159-1167.
- Brascamp J. W., Ee R. Van, Pestman W. R., Berg A. V. Van den. « Distributions of alternation rates in various forms of bistable perception ». *J. Vis.* 2005. Vol. 5, n°4, p. 1-1.
- Brascamp J. W., Klink P. C., Levelt W. J. M. « The 'laws' of binocular rivalry: 50 years of Levelt's propositions ». *Vis. Res.* 2015. Vol. 109, n°4A, p. 20-37.
- Breese B. B. « Binocular rivalry ». *Psychological Review.* 1909. Vol. 16, n°6, p. 410-415.
- Brown R. J., Norcia A. M. « A method for investigating binocular rivalry in real-time with the steady-state VEP ». *Vis. Res.* 1997. Vol. 37, n°17, p. 2401-2408.
- Browne M., Moffitt K. « Improving the Utility of a Binocular HMD in a Faceted Flight Simulator ». 2009.
- Browne M. P., Winterbottom M., Patterson R. E. « Performance and comfort of monocular head-mounted displays in flight simulators ». In : Marasco PL, Havig PR (éd.). 2010. p. 76880E.
- Capo-Aponte J. E., Temme L. A., Task H. L., Pinkus A. R., Kalich M. E., Pantle A. J., Rash C. E. *Visual perception and cognitive performance.* 2009.
- Carmel D., Arcaro M., Kastner S., Hasson U. « How to create and use binocular rivalry ». *J. Vis. Exp.* 2010. n°45, p. 1-8.
- Carrasco M., Evert D. L., Chang I., Katz S. M. « The eccentricity effect: Target eccentricity affects performance on conjunction searches ». *Perception & Psychophysics.* 1995. Vol. 57, n°8, p. 1241-1261.

- Casali J. G., Grenell J. F. « Noise-attenuating earmuff comfort: A brief review and investigation of band-force, cushion, and wearing-time effects ». *Appl. Acoust.* 1990. Vol. 29, n°2, p. 117-138.
- Chaumillon. *Dominance oculaire: implications neurophysiologiques et conséquences au niveau de la visuo-motricité*. Marseille, FR : Université Aix-Marseille, 2015.
- Chaumillon R., Alahyane N., Senot P., Vergne J., Lemoine C., Doré-Mazars K., Blouin J., Vergilino-Perez D., Guillaume A. « Vers une quantification de la dominance oculaire pour une meilleure prise en charge des pathologies de l'œil ». *J. Fr. Ophthalmol.* 2015. Vol. 38, n°4, p. 322-332.
- Chong S. C., Blake R. « Exogenous attention and endogenous attention influence initial dominance in binocular rivalry ». *Vis. Res.* 2006. Vol. 46, n°11, p. 1794-1803.
- Cohen J. « Eye-Dominance ». *AJP.* 1952. Vol. 65, n°4, p. 634. *
- Coren S., Kaplan C. P. « Patterns of ocular dominance ». *Optom. Vis. Sci.* 1973. Vol. 50, n°4, p. 283-292.
- Cupero F., Valimont B., Wise J., Best C., De Mers B. *Head worn display system for equivalent visual operations*. Phoenix, AR : Nasa, 2009.
- Denison R. N., Piazza E. A., Silver M. A. « Predictive context influences perceptual selection during binocular rivalry ». *Front. Hum. Neurosci.* 2011. Vol. 5, n°3, p. 1-11.
- Dieter K. C., Sy J. L., Blake R. « Individual differences in sensory eye dominance reflected in the dynamics of binocular rivalry ». *Vision Res.* 2017. Vol. 141, p. 40-50. *
- Dougherty K., Cox M. A., Westerberg J. A., Maier A. « Binocular Modulation of Monocular V1 Neurons ». *Curr. Biol.* 2019. Vol. 29, n°3, p. 381-391.e4.
- Ee R. Van, Boxtel J. J. A. Van, Parker A. L., Alais D. « Multisensory Congruency as a Mechanism for Attentional Control over Perceptual Selection ». *J. Neurosci.* 2009. Vol. 29, n°37, p. 11641-11649.
- Ehrenstein W., Arnold-Schulz-Gahmen B. E., Jaschinski W. « Eye preference within the context of binocular functions ». *Graefe's Arch. Clin. Exp. Ophthalmol.* 2005. Vol. 243, n°9, p. 926-932.
- Felleman D. J., Essen D. C. V. « Distributed hierarchical processing in the primate cerebral cortex ». *Cereb. Cortex.* 1991. p. 1-47.
- Fitzpatrick D., Lund J. S., Blasdel G. G. « Intrinsic connections of macaque striate cortex: afferent and efferent connections of lamina 4C ». *J. Neurosci.* 1985. Vol. 5, n°12, p. 3329-3349.

- Footo B., Melzer J. « A history of helmet mounted displays ». In : Desjardins DD, Sarma KR, Marasco PL, Havig PR (éd.). *SPIE Defense + Security*. Baltimore, Maryland, United States. 2015. p. 94700T.
- Fox R., Herrmann J. « Stochastic properties of binocular rivalry alternations ». *Perception & Psychophysics*. 1967. Vol. 2, p. 5.
- Glumm M. M., Marshak W. P., Branscome T. A., McWesler M., Patton D. J., Mullins L. L., US Department of Defense; Defense Technical Information Center. *A Comparison of Soldier Performance Using Current Land Navigation Equipment With Information Integrated on a Helmet-Mounted Display: (444032005-001)*. 1998.
- Goutcher R., Mamassian P. « Selective biasing of stereo correspondence in an ambiguous stereogram ». *Vis. Res.* 2005. Vol. 45, n°4, p. 469-483.
- Gronwall D. M. A., Sampson H. « Ocular dominance: a test of two hypotheses ». *Br. J. Psychol.* 1971. Vol. 62, n°2, p. 175-185.
- Häkkinen J. « A virtual display for mobile use ». In : *Society for Information Display. International Symposium Digest of Technical Papers*. 2004. p. 1586-1589.
- Hale S., Piccione D. *Pilot assessment of the AH-64 helmet mounted display system*. MD: U.S. Army Human Engineering Laboratory, 1989.
- Handa T., Mukuno K., Uozato H., Niida T., Shoji N., Shimizu K. « Effects of dominant and nondominant eyes in binocular rivalry ». *Optom. Vis. Sci.* 2004. Vol. 81, n°5, p. 377-383.
- Handa T., Uozato H., Higa R., Nitta M., Kawamorita T., Ishikawa H., Shoji N., Shimizu K. « Quantitative measurement of ocular dominance using binocular rivalry induced by retinometers ». *J Cataract Refract Surg.* 1 mai 2006. Vol. 32, n°5, p. 831-836.
- Haynes J. D., Deichmann R., Rees G. « Eye-specific effects of binocular rivalry in the human lateral geniculate nucleus ». *Nature*. 2005. Vol. 438, n°7067, p. 496-9.
- Helmholtz H. Von, Southall J. P. C. *Helmholtz's treatise on physiological optics*, Rochester, N.Y. : Optical Society of America, 1924.
- Hering E. *Spatial sense and movements of the eye*. Oxford, England : American Academy of Optometry, 1942. xii, 221. p.(Spatial sense and movements of the eye).
- Hershberger M. L., Guerin D. F. *Binocular rivalry in helmet-mounted display applications*. Culver City, CA : Aerospace Medical Research Laboratory, 1975.
- Hollins M. « The effect of contrast on the completeness of binocular rivalry suppression ». *Percept. Psychophys.* 1980. Vol. 27, n°6, p. 550-556.
- Hollins M., Leung E. H. « The influence of color on binocular rivalry ». In : *Visual psychophysics and physiology*. Elsevier, 1978. p. 181-190.

- Howard I. P. *Perceiving in Depth, Volume 1: Basic Mechanisms*. Oxford, New York : Oxford University Press, 2012. 672 p.(Oxford Psychology Series).
- Howard I. P., Rogers B. J. *Perceiving in Depth: Volume 2 Stereoscopic Vision*. Oxford University Press, 2012
- Hubel D. H., Wiesel T. N. « Binocular interaction in striate cortex of kittens reared with artificial squint ». *J. Neurophysiol.* 1965. Vol. 28, n°6, p. 1041-1059.
- Hupé J. M., James A. C., Payne B. R., Lomber S. G., Girard P., Bullier J. « Cortical feedback improves discrimination between figure and background by V1, V2 and V3 neurons ». *Nature*. 1998. Vol. 394, n°6695, p. 784-787.
- James W. *The Principles of Psychology*. H. Holt, 1890. 716 p.
- Jones R. « Fusional Vergence: Sustained and Transient Components ». *American Journal of Optometry and Physiological Optics*. 1980. Vol. 57, n°9, p. 640-644.
- Kang M. S., Heeger D., Blake R. « Periodic perturbations producing phase-locked fluctuations in visual perception ». *J. Vis.* 2009. Vol. 9, n°2, p. 8-8.
- Kang M.-S., Blake R. « Perceptual synergy between seeing and hearing revealed during binocular rivalry ». *Psichologija*. 2005. Vol. 32, p. 7-15.
- Khoe W., Mitchell J. F., Reynolds J. H., Hillyard S. A. « ERP evidence that surface-based attention biases interocular competition during rivalry ». *J. Vis.* 2008. Vol. 8, n°3, p. 18-18.
- Kollbaum P. S., Jansen M. E., Rickert M. E. « Comparison of patient-reported visual outcome methods to quantify the perceptual effects of defocus ». *Cont Lens Anterior Eye*. 2012. Vol. 35, n°5, p. 213-221.
- Kovács I., Papathomas T. V., Yang M., Fehér Á. « When the brain changes its mind: Interocular grouping during binocular rivalry ». *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1996. Vol. 93, n°26, p. 15508-15511.
- Laramée R. S., Ware C. « Rivalry and interference with a head-mounted display ». *ACM Trans. Comput. Hum. Interact.* 2002. Vol. 9, n°3, p. 238-251.
- Lederer J. « Ocular dominance ». *Clin. Exp. Optom.*. 1961. Vol. 44, n°11, p. 531-574.
- Lee S.-H., Blake R. « Rival ideas about binocular rivalry ». *Vision Res.* 1999. Vol. 39, n°8, p. 1447-1454.
- Leopold D. A., Logothetis N. K. « Activity changes in early visual cortex reflect monkeys' percepts during binocular rivalry ». *Nature*. 1996. Vol. 379, n°6565, p. 549-553.
- Leopold D. A., Logothetis N. K. « Multistable phenomena: changing views in perception ». *Trends Cogn. Sci.* 1999. Vol. 3, n°7, p. 254-264.
- Levelt W. J. M. *On binocular rivalry*. Amsterdam, NL : Van Gorcum Assen, 1965.

- Li J., Lam C. S. Y., Yu M., Hess R. F., Chan L. Y. L., Maehara G., Woo G. C., Thompson B. « Quantifying sensory eye dominance in the normal visual system: a new technique and insights into variation across traditional tests ». *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2010. Vol. 51, n°12, p. 6875-6881.
- Liu L., Tyler C. W., Schor C. M. « Failure of rivalry at low contrast: Evidence of a suprathreshold binocular summation process ». *Vis. Res.* 1992. Vol. 32, n°8, p. 1471-1479.
- Logothetis N. K., Leopold D. A., Sheinberg D. L. « What is rivalling during binocular rivalry? ». *Nature.* 1996. Vol. 380, n°6575, p. 621-624.
- Lumer E. D. « Neural Correlates of Perceptual Rivalry in the Human Brain ». *Science.* 1998. Vol. 280, n°5371, p. 1930-1934.
- Lunghi C., Alais D. « Touch Interacts with Vision during Binocular Rivalry with a Tight Orientation Tuning ». *PLOS One.* 2013. Vol. 8, p. e58754.
- Maxwell J., Tong J., Schor C. M. « The first and second order dynamics of accommodative convergence and disparity convergence ». *Vis. Res.* 2010. Vol. 50, n°17, p. 1728-1739.
- McKee S. P., Verghese P., Ma-Wyatt A., Petrov Y. « The wallpaper illusion explained ». *J. Vis.* 2007. Vol. 7, n°14, p. 10.
- Melzer J. « Head-mounted displays ». In : *Avionics: Elements, Software and Functions.* 2014. p. 5.1-5.20.
- Melzer J. E., Brozoski F. T., Letowski T. R., Harding T. H., Rash C. E. « Guidelines for HMD design ». In : *Helmet-Mounted Displays: Sensation, Perception and Cognition Issues.* Fort Rucker. 2009. p. 805-848.
- Meng M., Tong F. « Can attention selectively bias bistable perception? Differences between binocular rivalry and ambiguous figures ». *J. Vis.* 2004. Vol. 4, n°7, p. 2.
- Merryman R. F. K. « Vista Sabre II: integration of helmet-mounted tracker/display and high off-boresight missile seeker into F-15 aircraft ». In : Lewandowski RJ, Stephens W, Haworth LA (éd.). *SPIE's International Symposium on Optical Engineering and Photonics in Aerospace Sensing.* Orlando, FL. 1994. p. 173-184.
- Milgram P., Takemura H., Utsumi A., Kishino F. « Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum ». *Telemanipulator and Telepresence Technologies.* 1994. Vol. 2351.
- Mishra J., Hillyard S. A. « Endogenous Attention Selection during Binocular Rivalry at Early Stages of Visual Processing ». *Vis. Res.* 2009. Vol. 49, n°10, p. 1073-1080.
- Mitchell J. F., Stoner G. R., Reynolds J. H. « Object-based attention determines dominance in binocular rivalry ». *Nature.* 2004. Vol. 429, n°6990, p. 410-413.

- Naber M., Stuit S., De Kloe Y., Van der Stigchel S., Paffen C. L. E. « Adaptation to transients disrupts spatial coherence in binocular rivalry ». *Sci. Rep.* 2020. Vol. 10, n°1, p. 8673.
- Näsänen R., Ojanpää H., Kojo I. « Effect of stimulus contrast on performance and eye movements in visual search ». *Vis. Res.* 2001. Vol. 41, n°14, p. 1817-1824.
- Neveu P. *L'impact des dispositifs de visualisation en relief sur les composantes oculomotrices d'accommodation et de vergence*. These de doctorat. Paris 8, 2012.
- Norman H. F., Norman J. F., Bilotta J. « The temporal course of suppression during binocular rivalry ». *Perception*. 2000. Vol. 29, n°7, p. 831-841.
- Ooi T. L., He Z. J. « Binocular rivalry and visual awareness: the role of attention ». *Perception*. 1999. Vol. 28, n°5, p. 551-574.
- O'Shea R. P., Kornmeier J., Roeber U. « Predicting Visual Consciousness Electrophysiologically from Intermittent Binocular Rivalry ». *PLoS One*. 2013. Vol. 8, n°10, p. e76134.
- O'Shea R. P., Parker A., La Rooy D., Alais D. « Monocular rivalry exhibits three hallmarks of binocular rivalry: Evidence for common processes ». *Vis. Res.* 2009. Vol. 49, n°7, p. 671-681.
- O'Shea R. P., Sims A. J. H., Govan D. G. « The effect of spatial frequency and field size on the spread of exclusive visibility in binocular rivalry ». *Vis. Res.* 1997. Vol. 37, n°2, p. 175-183.
- Paffen C., Van der Stigchel S. « Shifting spatial attention makes you flip: Exogenous visual attention triggers perceptual alternations during binocular rivalry ». *Atten Percept Psycho*. 2010. Vol. 72, n°5, p. 1237-1243.
- Palmer S. E. *Vision science: Photons to phenomenology*. MIT press. Massachusetts, US : MIT press, 1999.
- Patterson R., Winterbottom M. D., Pierce B. J. « Perceptual issues in the use of head-mounted visual displays ». *Hum. Factors*. 2006. Vol. 48, n°3, p. 555-573.
- Patterson R., Winterbottom M., Pierce B., Fox R. « Binocular rivalry and head-worn displays ». *Hum. Factors*. 2007. Vol. 49, n°6, p. 1083-1096.
- Peli E. « Visual issues in the use of a head-mounted monocular display ». *Opt. Eng.* 1990. Vol. 29, n°8, p. 883-893.
- Pointer J. S. « Sighting versus sensory ocular dominance ». *J. Optom.* 2012. Vol. 5, n°2, p. 52-55.
- Polonsky A., Blake R., Braun J., Heeger D. J. « Neuronal activity in human primary visual cortex correlates with perception during binocular rivalry ». *Nat. Neurosci.* 2000. Vol. 3, n°11, p. 1153-1159.
- Porac C., Coren S. « The dominant eye ». *Psychol. Bull.* 1976. Vol. 83, n°5, p. 880-97.

- Porac C., Whitford F. W., Coren S. « The relationship between eye dominance and monocular acuity: an additional consideration. » *American journal of optometry and physiological optics*. 1976. Vol. 53, n°12, p. 803-806.
- Purves D. *Neuroscience*. 3rd ed. Sunderland, Mass : Sinauer Associates, Publishers, 2004. 1 p.
- Rachel R. A., Reese B. E. *Optic nerve, optic chiasm, and optic tracts*. Oxford, UK : Academia press, 2009.
- Rash C. E., McLean W. E., Mora J. C., Ledford M. H., Mozo B. T. *Design Issues for Helmet-Mounted Display Systems for Rotary-Wing Aviation*. Fort Belvoir, VA : Defense Technical Information Center, 1998.
- Rash C. E., McLean W. E., Mozo B. T., Licina J. R., McEntire B. J. « Human Factors and Performance Concerns for the Design of Helmet-Mounted Displays (Reprint) ». 1999. p. 22.
- Rash C. E., Russo M. B., Letowski T. R., Schmeisser E. T. *Helmet-Mounted Displays: Sensation, Perception and Cognition Issues*. Fort Rucker, AL : Army Aeromedical Reserach Lab, 2009.
- Rash C. E., Suggs C. L., Mora J. C., Pol C. Van da, Reynolds B. S., Crowley J. S. *Visual Issues Survey of AH-64 Apache Aviators (Year 2000)*. USAARL, 2001.
- Roeber U., Vesper S., Schröger E., O'Shea R. P. « On the Role of Attention in Binocular Rivalry: Electrophysiological Evidence ». *PLOS One*. 2011. Vol. 6, n°7.
- Rolland J. P., Biocca F., Hamza-Lup F., Ha Y., Martins R. « Development of Head-Mounted Projection Displays for Distributed, Collaborative, Augmented Reality Applications ». *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 2005. Vol. 14, n°5, p. 528-549.
- Roumes C., Plantier J., Menu J. P., Thorpe S. « The effects of spatial frequency on binocular fusion: from elementary to complex images ». *Hum. Factors*. 1997. Vol. 39, n°3, p. 359-373.
- Scheiman M., Gallaway M., Frantz K. A., Peters R. J., Hatch S., Cuff M., Mitchell G. L. « Nearpoint of Convergence: Test Procedure, Target Selection, and Normative Data ». *Optom. Vis. Sci*. 2003. Vol. 80, n°3, p. 214-225.
- Schor C., Heckmann T., Tyler C. W. « Binocular fusion limits are independent of contrast, luminance gradient and component phases ». *Vis. Res*. 1989. Vol. 29, n°7, p. 821-835
- Seijas O., De Liaño P. G., De Liaño R. G., Roberts C. J., Piedrahita E., Diaz E. « Ocular dominance diagnosis and its influence in monovision ». *Am. J. Ophthalmol*. 2007. Vol. 144, n°2, p. 209-216.
- Semmlow J., Hung G., Ciuffreda K. « Quantitative assessment of disparity vergence components ». *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 1986. Vol. 27, p. 558-64.

- Semmlow J. L., Yuan W. « Adaptive Modification of Disparity Vergence Components: An Independent Component Analysis Study ». *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2002. Vol. 43, n°7, p. 2189-2195.
- Sherman S. M., Guillery R. W. « Functional organization of thalamocortical relays ». *Journal of neurophysiology.* 1996. Vol. 76, n°3, p. 1367-1395.
- Silver M. A., Logothetis N. K. « Temporal frequency and contrast tagging bias the type of competition in interocular switch rivalry ». *Vis. Res.* 2007. Vol. 47, n°4, p. 532-543.
- Simons D. J., Chabris C. F. « Gorillas in our midst: Sustained inattentive blindness for dynamic events ». *Perception.* 1999. Vol. 28, n°9, p. 1059-1074.
- Su Y., He Z. J., Ooi T. L. « Coexistence of binocular integration and suppression determined by surface border information ». *PNAS.* 2009. Vol. 106, n°37, p. 15990-15995.
- Suttle C., Alexander J., Liu M., Ng S., Poon J., Tran T. « Sensory ocular dominance based on resolution acuity, contrast sensitivity and alignment sensitivity ». *Clin. Exp. Optom.* 2009. Vol. 92, n°1, p. 2-8.
- Tong F. « Primary visual cortex and visual awareness: Cognitive neuroscience ». *Nat. Rev. Neurosci.* 2003. Vol. 4, n°3, p. 219-229.
- Tong F., Engel S. A. « Interocular rivalry revealed in the human cortical blind-spot representation ». *Nature.* 2001. Vol. 411, p. 5.
- Tong F., Meng M., Blake R. « Neural bases of binocular rivalry ». *Trends Cogn. Sci.* 2006. Vol. 10, n°11, p. 502-511.
- Tong F., Wong A., Meng M., McKeef T. J. « Brain areas involved in attentional control and perception of ambiguous figures ». *J. Vis.* 2002. Vol. 2, n°7, p. 677-677.
- Velger M. *Helmet mounted displays & sights.* illustrated éd. Boston, MA : Artech House, 1998. 291 p.
- Verhoeff F. H. « A new theory of binocular vision ». *Arch Ophthalmol.* 1935. Vol. 13, n°2, p. 151-175.
- Wade N. J., De Weert C. M. M. « Binocular Rivalry with Rotary and Radial Motions ». *Perception.* 1986. Vol. 15, n°4, p. 435-442.
- Walker P. « Stochastic properties of binocular rivalry alternations ». *Perception & Psychophysics.* 1975.
- Walker P. « Binocular rivalry: Central or peripheral selective processes? ». *Psychol. Bull.* 1978. Vol. 85, n°2, p. 376-389.
- Wilson H. R., Blake R., Lee S.-H. « Dynamics of travelling waves in visual perception ». *Nature.* 2001. Vol. 412, n°6850, p. 907-910.

- Winterbottom M. D., Patterson R. E., Pierce B. J., Covas C., Rogers J. « Binocular rivalry and attention in helmet-mounted display applications ». In : *Human Factors And Ergonomics Society*. San Francisco, CA. 2006. p. 2061-2065.
- Winterbottom M. D., Patterson R., Pierce B. J., Taylor A. « Visual suppression of monocularly presented symbology against a fused background in a simulation and training environment ». 2006. Vol. 6224, p. 622402.
- Winterbottom M., Patterson R., Pierce B., Gaska J., Hadley S. « Visibility of monocular symbology in transparent head-mounted display applications ». In : Desjardins DD, Sarma KR, Marasco PL, Havig PR (éd.). 2015. p. 94700Z.
- Wolfe J. M. « Influence of spatial frequency, luminance, and duration on binocular rivalry and abnormal fusion of briefly presented dichoptic stimuli ». *Perception*. 1983. Vol. 12, n°4, p. 447-456.
- Yang E., Blake R., McDonald J. E. « A new interocular suppression technique for measuring sensory eye dominance ». *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci*. 2010. Vol. 51, n°1, p. 588-593.
- Zeki S., Shipp S. « The functional logic of cortical connections ». *Nature*. 1988. Vol. 335, n°6188, p. 311-317.
- Zhang P., Jamison K., Engel S., He B., He S. « Binocular Rivalry Requires Visual Attention ». *Neuron*. 2011. Vol. 71, n°2, p. 362-369.
- Zhou W., Jiang Y., He S., Chen D. « Olfaction Modulates Visual Perception in Binocular Rivalry ». *Curr. Biol*. 2010. Vol. 20, p. 1356-8.

Annexes

Annexe 1 : Glossaire	172
Annexe 2 : Questionnaire de fin d'essai sur le confort visuel utilisé dans les trois études.....	173
Annexe 3 : Trajectoire empruntée par la cible lors de l'étude I.....	174
Annexe 4 : Résultats des tests optométriques de l'étude I.....	175
Annexe 5 : Bruit appliqué au FPV pour simuler une tâche de pilotage dans l'étude III.	176
Annexe 6 : Performance de suivi moyennée sur l'ensemble des participants et sur toutes les conditions d'affichage en fonction du temps de l'étude III	177
Annexe 7 : Synthèse des résultats des trois études.....	178
Annexe 8 : Publications	179

Annexe 1 : Glossaire

Semi -décussation des voies visuelles : Alors que la décussation signifie un croisement en forme de X, la semi-décussation des voies visuelles concerne uniquement le croisement des fibres des parties nasales des deux rétines au niveau du chiasma optique.

Controlatéral : Lorsqu'est évoqué la projection des fibres de l'hémi-rétine gauche vers l'hémisphère controlatéral, cela signifie qu'elles rejoignent l'hémisphère opposé à leur provenance, le droit.

Ipsilatéral : Lorsqu'est évoqué la projection des fibres de l'hémi-rétine gauche vers l'hémisphère ipsilatéral, cela signifie qu'elles rejoignent l'hémisphère du même côté à leur provenance, le gauche.

Cristaux liquides ferroélectriques sur silicium (FLCoS) : Les cristaux liquides réfléchissent la lumière d'une source vers une lentille ou un prisme qui recueille la lumière et affiche l'image. Les cristaux liquides ferroélectriques (FLC), parfois utilisés dans les dispositifs LCoS , sont des cristaux qui s'alignent à un angle fixe par rapport à la normale en rangées ordonnées. Ils développent également une polarité électrique lorsqu'ils entrent en contact avec une charge électrique. Ils agissent comme des portes ou des vannes, contrôlant la quantité de lumière qui atteint la surface réfléchissante. Plus le cristal d'un pixel particulier reçoit de tension, plus le cristal laisse passer de lumière.

Lunettes actives : Il s'agit d'équipements permettant la restitution du relief par asservissement de la lunette à la stimulation stéréoscopique. Elles sont composées d'écran qui deviennent opaque alternativement du côté droit et du côté gauche, de manière que chaque œil reçoive l'image qui lui est destinée.

Annexe 2 : Questionnaire de fin d'essai sur le confort visuel utilisé dans les trois études

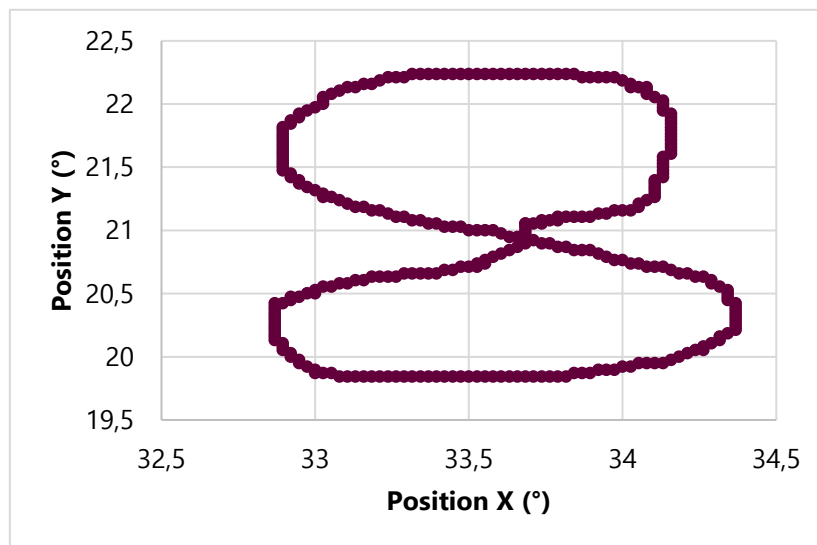
Veillez donner oralement un score de 0 à 5 (0 étant aucun symptôme, 5 un symptôme intolérable) par rapport à la stimulation générée par la condition effectuée concernant le ressenti :

- d'une fatigue visuelle ;
- de maux de tête ;
- d'une vision double ;
- d'une vision trouble ;
- de tiraillements oculaires ;
- de difficultés de concentration ;
- de nausées ;
- de vertiges.

Avez-vous ressenti d'autres gênes non citées ? Si oui lesquelles ?

Lors de l'exposition, avez-vous ressenti une suppression de la totalité ou d'une partie du fond ou de l'élément monoculaire ? Si oui, quelle partie, combien de fois et environ combien de temps ?

Annexe 3 : Trajectoire empruntée par la cible lors de l'étude I

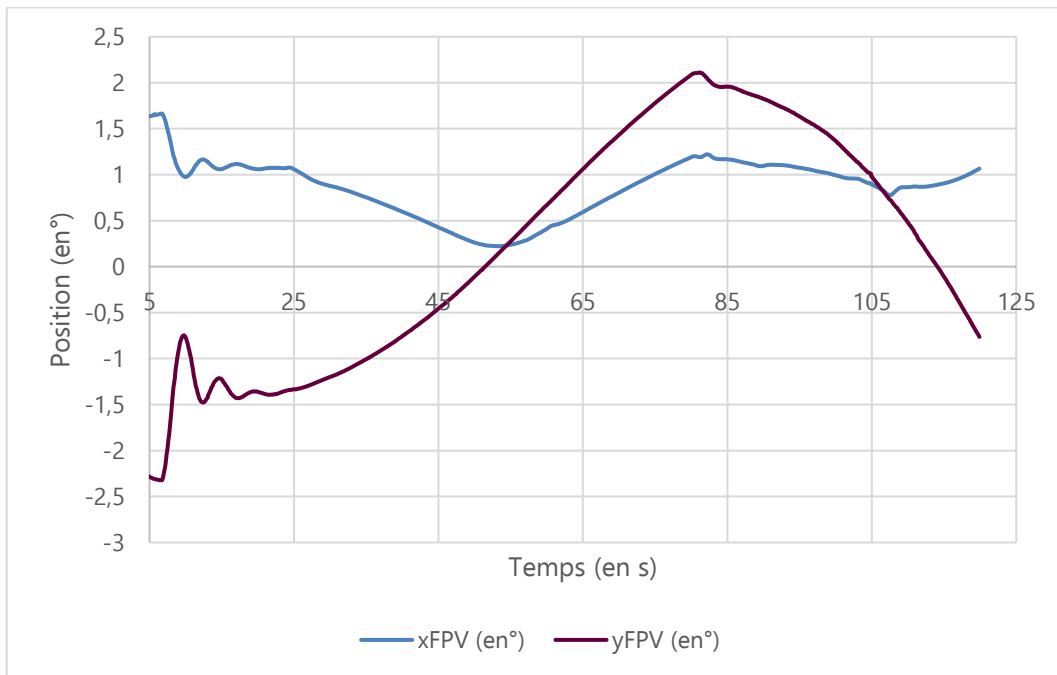


La cible se déplace à une vitesse de 2°/s et parcourt cette trajectoire environ six fois durant la totalité de l'essai.

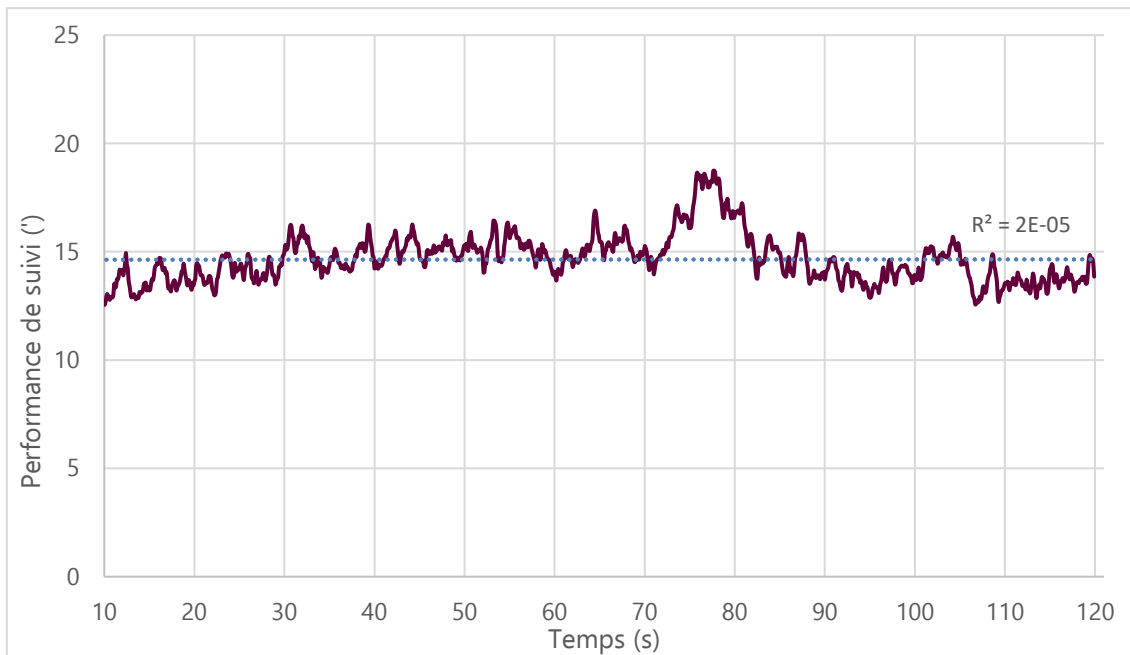
Annexe 4 : Résultats des tests optométriques de l'étude I

BI = Base interne ; BE = Base externe

	Session 1			Session 2		
	Pré-essai	Post-essai	<i>p-value</i>	Pré-essai	Post-essai	<i>p-value</i>
	Moyenne ± Écart-type	Moyenne ± Écart-type		Moyenne ± Écart-type	Moyenne ± Écart-type	
Phories	0,08 ± 1,33	0,33 ± 1,36	0,58	0,33 ± 1,52	0,42 ± 0,42	0,88
Disparité	-0,14 ± 0,45	-0,19 ± 0,89	0,82	-0,14 ± 0,76	-0,11 ± -0,11	0,91
Réserves fusionnelles						
Flou BI	5,44 ± 1,50	5,89 ± 2,32	0,50	5,89 ± 1,20	6,11 ± 2,22	0,75
Bris BI	6,67 ± 1,94	6,89 ± 2,30	0,76	7,11 ± 1,97	7,33 ± 1,94	0,74
Recouvrement BI	4,67 ± 1,94	4,78 ± 2,07	0,87	5,11 ± 1,97	5,44 ± 2,15	0,63
Flou BE	10,56 ± 4,59	10,67 ± 3,82	0,94	10,33 ± 4,19	11,33 ± 3,69	0,45
Bris BE	22,89 ± 8,52	23,28 ± 9,94	0,90	23,83 ± 9,93	24,39 ± 10,96	0,87
Recouvrement BE	17,83 ± 5,95	18,56 ± 9,08	0,78	17,94 ± 7,08	19,33 ± 9,63	0,63
Vergence forcée						
3Δ BI	0,14 ± 0,34	0,39 ± 0,88	0,27	0,25 ± 0,55	0,25 ± 0,65	1
6Δ BI	0,39 ± 0,50	0,75 ± 0,58	0,05	0,50 ± 0,57	0,69 ± 0,79	0,40
10Δ BI	1,64 ± 0,95	1,64 ± 0,95	0,80	1,69 ± 0,94	1,62 ± 1,11	0,69
3Δ BE	-0,58 ± 1,02	-0,47 ± 0,98	0,74	-0,25 ± 0,58	-0,47 ± 1,09	0,45
6Δ BE	-0,77 ± 0,89	-0,94 ± 0,97	0,74	-0,64 ± 1,14	-0,74 ± 1,16	0,42
10Δ BE	-1,19 ± 2,14	-1,69 ± 1,61	0,43	-0,91 ± 1,05	-1,03 ± 1,04	0,86

Annexe 5 : Bruit appliqué au FPV pour simuler une tâche de pilotage dans l'étude III.

Annexe 6 : Performance de suivi moyennée sur l'ensemble des participants et sur toutes les conditions d'affichage en fonction du temps de l'étude III



Annexe 7 : Synthèse des résultats des trois études

		Contraste du fond binoculaire	Fréq. spatiales du fond binoculaire	Contraste de la symbologie	Pulsation de la symbologie	Interaction contraste/ pulsation	Œil de présentation
Erreur de suivi	Etude I	100%-60%<20%	HF<BF	NS	sans puls. < avec puls.	NS	N = 4 (10D ; 3OG)
	Etude II	NS		Max<Min	NS	NS	∅
	Etude III	Nuageux < Dégagés (jour et nuit)		NS	NS	NS	N = 17 (13OD ; 4OG)
Evènements	Etude I Temps : - détection - fixation - latence	Détection : • 20%<60%<100% Fixation : • 20-60% < 100%	Fixation : • BF<HF	<u>HF 100%</u> : Détection et latence : • cont.0,6 < cont.1 <u>BF100%</u> : Détection et latence : • cont.0,6 < cont.1 <u>BF60%</u> : Détection: • cont.1 < cont.0,6 Latence : • cont.0,6 < cont.1 <u>BF20%</u> : NS	<u>HF100%</u> : Détection : • sans puls. < avec puls. <u>BF100%</u> : Détection : • avec puls. < sans puls. <u>BF 60%</u> : Détection : • sans puls. < avec puls. <u>BF20%</u> : Détection : • sans puls. < avec puls.	<u>HF 100%</u> : Détection et Latence : • cont.1 : sans puls. < avec puls. • avec puls. : cont.0,6 < cont.1 <u>BF100%</u> : Détection et Latence : • cont.0,6 : avec puls. < sans puls. • avec puls. : cont.0,6 < cont.1 <u>BF60%</u> : Fixation : • cont.1 : avec puls. < sans puls. • cont.0,6 : sans puls. < avec puls. • avec puls. : cont.1 < cont.0,6 • sans puls. (mono) : cont. 1 < cont.0,6 • sans puls. (bino) : cont 0,6 < cont.1 <u>BF20%</u> : Détection, Fixation et latence : • cont.1 : sans puls. < avec puls. • cont.0,6 : avec puls. < sans puls. • avec puls. : cont.0,6 < cont.1 • sans puls. : cont.1 < cont.0,6	Détection : N = 5 (3OD ; 2OG) Fixation : N = 2 (1OD ; 1OG) Latence : N = 0
	Etude II Temps : - détection	25%<100%	NS	NS	Tendance : profil 2 < sans puls.- profil 1 < profil 3	NS	∅
	Etude III Temps : - détection	En luminance symbo max : nuageux < nuit De nuit : Lum min < Lum max			NS		N = 7 (6 OD ; 1 OG)
Perte d'information	Etude I	NS				NS	NS
	Etude II	NS				NS	∅
	Etude III	Nuageux < Jour < Nuit Nuit : Lum Min < Lum Max			NS		N = 6 (4 OD ; 2 OG)

Annexe 8 : Publications

Communications dans des congrès internationaux

- Bayle E., Hourlier S., Lelandais S., C-A. Salasc, Leroy L., Plantier J, Neveu P. « Monocular augmented reality devices: does the choice of eye matter? ». *Situation Awareness in Degraded Environments 2020*. International Society for Optics and Photonics, 2020. p. 114240B.
- Bayle E., Guilbaud E., Hourlier S., Lelandais S., Leroy L., Plantier J., Neveu P. « Binocular rivalry in monocular augmented reality devices: a review ». *Situation Awareness in Degraded Environments 2019*. International Society for Optics and Photonics, 2019. p. 110190H.
- Bayle E., Guilbaud E., Hourlier S., Lelandais S., Leroy L., Plantier J, Neveu P. « Which ocular dominance should be considered for monocular augmented reality devices? ». *20th International Symposium on Aviation Psychology, 379-384*, 2019. p. 6.

Article de journal soumis

- Bayle E., Hourlier S., Lelandais S., C-A. Salasc, Leroy L., Plantier J, Neveu P. « Impact of visual characteristics on performance and comfort using dynamic monocular augmented reality » PLOS One, 2021.

Bayle E., Hourlier S., Lelandais S., C-A. Salasc, Leroy L., Plantier J, Neveu P. « Monocular augmented reality devices: does the choice of eye matter? ». In : *Situation Awareness in Degraded Environments 2020* [En ligne]. *Situation Awareness in Degraded Environments 2020*. International Society for Optics and Photonics, 2020. p. 114240B.

PROCEEDINGS OF SPIE

[SPIDigitalLibrary.org/conference-proceedings-of-spie](https://spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie)

Monocular augmented reality devices: does the choice of eye matter?

Bayle, Elodie, Hourlier, Sylvain, Lelandais, Sylvie, Salasc, Charles-Antoine, Leroy, Laure, et al.

Elodie Bayle, Sylvain Hourlier, Sylvie Lelandais, Charles-Antoine Salasc, Laure Leroy, Justin Plantier, Pascaline Neveu, "Monocular augmented reality devices: does the choice of eye matter?," Proc. SPIE 11424, Situation Awareness in Degraded Environments 2020, 114240B (22 April 2020); doi: 10.1117/12.2558574

SPIE.

Event: SPIE Defense + Commercial Sensing, 2020, Online Only

Downloaded From: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie> on 27 Jan 2021 Terms of Use: <https://www.spiedigitallibrary.org/terms-of-use>

Invited Paper

Monocular augmented reality devices: does the choice of eye matter?

Elodie Bayle^{*a,b,c}, Sylvain Hourlier^b, Sylvie Lelandais^c, Charles-Antoine Salasc^a
Laure Leroy^d, Justin Plantier^{a,c}, Pascaline Neveu^a

^aFrench Armed Forces Biomedical Research Institute, Brétigny-sur-Orge, France; ^bThales AVS France SAS, Mérignac, France; ^cIBISC, Univ Evry, Université Paris Saclay, Evry, France; ^dParis 8 University, Saint-Denis, France

ABSTRACT

Monocular augmented reality devices are used in aviation to help civilian or military pilots in their flying task. Given that the image is presented in front of only one eye, the two eyes are not stimulated in the same way and it can create a phenomenon known as binocular rivalry. It appears when the brain is not able to merge the two visual information and an alternation between them can occur. This alternation is dependent on visual condition and the question arises as it is relevant to choose the eye to display the image to limit binocular rivalry and guarantee a good performance in the tasks of recognition and control. Our study aims to compare the performances as a function of the position of the virtual image. These results are then compared to the results of several dominant eye tests to determine if one test can objectively determine on which eye the monocular information should be displayed when using a monocular see-through device.

Keywords: Monocular augmented reality device, ocular dominance, binocular rivalry

1. INTRODUCTION

Recent years have seen steady progress in vision-assistance technology. One example is image intensifier that enhance night vision, another is augmented reality devices that can display virtual interactive information which is combined and superimposed on the environment in real time. The latter tool is offered to civil and military aviation to assist pilots – flight symbology usually shown on the primary flight display can be displayed directly in front of the pilot's eyes. It generally includes, the artificial horizon, aircraft speed, and altitude and is controlled in real time as the aircraft moves. Two types of augmented reality devices are found in cockpits: the *Head Up Display* which is fixed and difficult to adapt to an existing aircraft or the *Head Mounted Display* (HMD) which is worn by the pilot and allows him or her to visualize flight symbology even when the head is turned. This article relates to the latter type of technology.

There are three types of HMD: *binocular* (display to both eyes, one image is dedicated to each eye), *biocular* (display to both eyes, one image for both eyes) or *monocular* (display of one image to one eye). The disadvantage of binocular and biocular devices is that the imagers must be precisely adjusted which is user dependent. Monocular displays have the advantage of being more adjustable than their binocular counterparts, as information can be easily centered relative to one observer's pupil. They are also less expensive and lighter¹.

In monocular displays, virtual information is presented in front of one eye. As the visual stimulation is different for each eye, this can be a source of binocular rivalry. This occurs when different images are presented to the corresponding regions of both eyes². Image perception can alternate between the eyes; over time, the image presented to one eye is visible while the other is suppressed and *vice versa*, interspersed with periods during which part of each image may be visible simultaneously³ (a phenomenon known as fragmented rivalry or mixed dominance⁴). These random alternations opened the debate on the neuronal origin of the binocular rivalry.

More specifically, debate has centered on whether rivalry is between the two eyes, or between the rival stimuli^{2,4-6}. Various authors support the postulate that it is the stimuli that are rival^{6,7}, based on the observation that it is possible to have slow, alternating perceptions when the images presented to each eye alternate rapidly⁸. Competition resulting from rivalry should,

*elodie.bayle@fr.thalesgroup.com

therefore, be found in high-level visual areas (V4 and the inferior temporal cortex) where image properties are represented⁷. However, there is evidence that binocular rivalry is very sensitive to information coming from the eye^{3,9}. For example, change in one stimuli (spatial frequency, orientation or contrast) may go completely unnoticed for several seconds, if it occurs during the suppression phase^{10,11}. This suppression, dissociated from the stimulus, implies that binocular rivalry is related to the eye, rather than to the interpretation of the stimulus. Furthermore, when rival dominant/suppressed stimuli are exchanged between the two eyes, there is an immediate reversal of the dominant stimulus⁵. This observation supports the idea that it is the eye that dominates, rather than the stimulus. Given the arguments raised by both theories, recently, a consensus seems to have emerged that binocular rivalry can occur at different levels of neural processing^{2,4,12-15}. However, it should be noted that studies on binocular rivalry are all based on the presentation of totally dichotic stimuli (*i.e.* the two eyes are exposed to different, but simultaneous stimuli), and not monocular information on a binocular background.

Depending on the display conditions, binocular rivalry can cause visual fatigue, headaches, visual suppression, etc.². The literature has established that, for dichotic images, binocular rivalry is a function of stimulation conditions^{2,6,17,18} (not only spatial frequency, contrast and movement of the binocular environment, but also from virtual information). The conditions that interest us concern a monocular virtual image that is superimposed on a binocular background environment. In this case, binocular rivalry is known to also be a function of the display conditions^{16,19,20} (spatial frequency, contrast, size, speed, etc.). However, to date, there is no consensus in the literature on the effect of the display eye on comfort and performance in skills such as tracking, detection or target identification. Indeed, Hershberger and Guerin¹⁶ found that disturbing phenomena were reduced when information was displayed to the dominant eye, while, more recently, Cupero et al.²¹ found that there was no influence of the presentation eye on perception. The study of Browne et al.²², evaluating the effect of image contrast on binocular rivalry, found similar results than Cupero et al.²¹. However, the authors speculated that, under degraded conditions, there may be an effect of ocular dominance. They postulated that as in low contrast conditions, performance with monocular equipment is poorer than with binocular equipment, ocular dominance may be a relevant parameter in this case.

Therefore, this article addresses the question of whether, when using a monocular augmented reality device, the eye, that the virtual image is displayed to, is relevant. We hypothesize that the performance of both eyes and/or their information processing is not identical and study the phenomenon through the notion of ocular dominance. Initially, ocular dominance was thought to reflect general body lateralization. This was the hypothesis put forward in the first study carried out in 1593 by Porta (as cited by Coren and Kaplan²³, review by Borelli et al.²⁴). However, it has since been shown that ocular dominance is uncorrelated with other body lateralization (dominant hand and/or foot)²⁵. While body lateralization is related to the dominance of the contra-lateral cerebral hemispheres²³ (the left cerebral hemisphere is dominant in right-handed people, for example), optic nerve fibers from each eye undergo a semi-decussation at the optic chiasma. Fibers from each optic nerve are, therefore, present in both cerebral hemispheres^{23,26-28} and do not, unlike body dominance, reflect the dominance of one of the cerebral hemispheres.

We begin with a definition of ocular dominance. The review by Gronwall and Sampson²⁹ found a positive correlation between a variety of dominance tests, suggesting a unifactorial phenomenon. Other authors^{30,31} have suggested that it can be broken down into two main types: motor dominance (sight), and sensory dominance (sensory/rivalry)²³. Lederer³² considers five parameters: monocular acuity, motor dominance, orientation dominance, sensory dominance and hemi-retinal dominance. The latter refers to the dominance of one half of the binocular visual field (right or left), which could be directly related to cerebral dominance.

In general, three types of ocular dominance are regularly found in the literature. It can, therefore, be defined as the superiority (or preference) of one eye (the directing eye) over the other in terms of sight (*i.e.* motor dominance^{23,29,33-36}), acuity or perception in the case of binocular rivalry (*i.e.* sensory dominance)²⁶.

For the purposes of our study, the following definitions are used:

- Chaumillon et al.³⁷ define *motor dominance* (sighting dominance) as the eye that we spontaneously choose when we have to perform monocular tasks (looking through a microscope, aiming a gun, looking through a lock, etc.).
- Suttle et al.²⁶ define *acuity dominance* as the better-perceiving eye with greater capacity for discrimination.
- Berner et Berner³¹ define *sensory dominance* as the control eye in binocular perception situations, such as binocular rivalry³⁸.

In the literature, there is few match between the notions of motor, acuity and sensory dominance^{23,27,33}. Indeed, tests of such a fuzzy theoretical concept are very unlikely to examine the same thing²³. In view of the visual constraints imposed

by monocular augmented reality systems, and the literature on ocular dominance, it is relevant to ask whether the dominance considered by Hershberger and Guerin¹⁶ and Cupero et al.²¹ is really appropriate when determining the eye to present monocular information to, notably as both studies considered motor dominance. It seems reasonable to assume that binocular rivalry associated with monocular augmented reality devices is, as indicated by Berner and Berner³¹, more associated with sensory dominance.

The literature that uses dichotic images measures binocular rivalry by tracking fluctuations in the observer's ocular dominance with respect to the perceived image, over time. Typically, the rate of perceptual alternation, the average duration and total duration of stimulus dominance are measured. Given that the observer may not be aware of the phenomenon when using monocular augmented reality devices, this measure cannot be reproduced in our study. Nevertheless, if a stimulus appears during a suppression phase, the observer will be unable to detect or identify it; this is an indication of a loss of information due to suppression. Our study, therefore, examines binocular rivalry by measuring performance in a target tracking task *and* a target detection and identification task^{16,19,21}. As noted above, binocular rivalry is known to cause symptoms such as visual fatigue, headaches, visual suppression, and eye strain. We therefore also use a measure of subjective comfort to assess the phenomenon²¹.

The objective of this study is, therefore, to determine whether subjective comfort, and performance in target tracking, detection and identification tasks^{16,19,21} are influenced by ocular dominance when exposed to a stress similar to monocular augmented reality. Ocular dominance is determined upstream by a range of tests. First, we study correlations between test results in order to determine whether they are similar, or whether they can be classified into different types, as has been identified in the literature^{23,26,29,33,34,39}. In a second step, subjective comfort and performance are evaluated and compared between monocular information presented to one eye and the other, in two conditions: optimal display conditions (high spatial frequency, high contrast), and degraded conditions (low spatial frequency, low contrast). We link results from the two studies to determine whether one (or more) of the tests run in the first part can reliably determine which eye to display monocular information to, with the aim of optimizing both performance and comfort.

2. METHOD

2.1 Participants

Thirty-three participants were recruited (20 women and 13 men) aged 21 to 60 years (mean 33.9±10.0). Inclusion criteria were: uncompensated ametropia limited to ±1.00 D, measured with the Nidek AR600A (Nidek, Aichi, Japan) autorefractometer; compensated far (6 m) and near vision (0.4 m) acuity of ≤0.03 log units for each eye; and anisometropia of less than 2.00 D. They should not have motor, neurological or oculomotor problems but they should have a stereoscopic acuity ≤120 arcseconds and be aware of physiological diplopia.

2.2 Ocular dominance tests

Eight clinical and laboratory tests were run to determine ocular dominance.

2.2.1 Near visual acuity

A measurement of near visual acuity in each eye was made at 0.4 m under normal lighting conditions (551 lux), with additional light directed towards the test. The measurement used a morphoscopic optotype with logarithmic progression. The eye with the best acuity score was determined to be the dominant eye. In the case of a tie, the participant was given a score of 0.

2.2.2 Far visual acuity

A far visual acuity measurement in each eye was made at 6 m under normal lighting conditions. The measurement used an optotype composed of Landolt rings with decimal progression. The eye with the best acuity score was determined to be the dominant eye. In the case of a tie, the participant was given a score of 0.

2.2.3 Near Point of Convergence (NPC)

This measurement was made under normal lighting conditions. Participants were asked to binocularly fixate on a lamp pen moving at a speed of 1 to 2 cm/s⁴⁰ over 0.5 m held in front of their nose in the sagittal plane⁴¹. The first eye to release the fixation was considered the dominated eye^{36,42}. The measurement was made only once³³.

2.2.4 Hole in card

The measurement was made under normal lighting conditions. Participants were asked to hold a hole card (the dominant eye test card, usaeyes.org) with both hands at arm's length, centered in front of them. With both eyes open, they fixated through the central hole in the card, on the letter with the smallest decipherable acuity line at 6 m³⁴. While continuing to fixate on the letter, they slowly brought the card towards them until it touched the face. The eye behind the hole was considered to be dominant³⁹. The procedure was repeated three times³⁴.

2.2.5 Near Worth

The measurement was made under low ambient lighting (5 lux). The Worth test was presented at 0.33 m, slightly below the participant's line of sight and consisted of four points of equal luminance. The participant wore red/green anaglyphs over his or her usual visual compensation. The green filter was placed over the left eye and the red over the right eye. The participant was asked to determine the color of the bottom point. If they perceived it as white, no dominance was recorded, if it was red, the right eye was considered dominant, if it was green, the left eye was considered dominant³⁶. The measurement was made only once³³.

2.2.6 Blur sensitivity

The measurement was made under normal lighting conditions. The participant was asked to binocularly fixate on the smallest decipherable acuity line at 6 m³⁴. An undipped +1.50 δ lens was placed in front of the right eye and removed. The participant was then asked to rate his or her subjective assessment on a Visual Analogue Scale (VAS)⁴³. The assessment was then made with the lens over the left eye³⁴. Three measurements were taken for each eye and averaged. The eye with the greatest fall in subjective assessment on the VAS scale was considered the dominant eye.

2.2.7 Form rivalry

This test was developed based on methods given in Coren et Kaplan²³ and Handa et al.³⁸. The measurement was made in low ambient light³⁸.

Apparatus

The participants were seated in front of a stereoscope and stabilized via a chinrest, with their chin and forehead supported³⁸. The stereoscope was composed of two, 22-inch ViewSonic LCD screens at 120 Hz with equalized luminance, and two pairs of deflecting mirrors inclined at 45° to the sagittal plane. He or she was positioned 0.50 m from the screen²⁵, and perceived a minimum field of view of 18.30° horizontally and 21.17° vertically (Figure 1). The participant indicated what they could see via a response box. The duration of the visibility of each stimulus was recorded.

Stimuli

Stimuli were sinusoidal striae oriented at 0° for the right eye, and 90° for the left eye²³. Maximum and minimum target luminance were 120 and 0.8 cd/m², respectively, and average luminance of the target and background was 42 cd/m²³⁸. Contrast and spatial frequency were fixed at 100%, and 4 cpd respectively. Four presentations, each lasting ten seconds were made, with three seconds pause between each. The procedure was repeated three times.

Procedure

Prior to the trial, participants were shown the image that would be presented to each eye, and a sample of a mix of the two images³⁸. The participant was asked to press a horizontal button on the box when the right target was exclusively perceived, and a vertical button when the left target was exclusively perceived. In the case of a mixed perception, they were instructed to not press any button³³. The dominant eye was determined to be the one with the longest exclusive vision time.

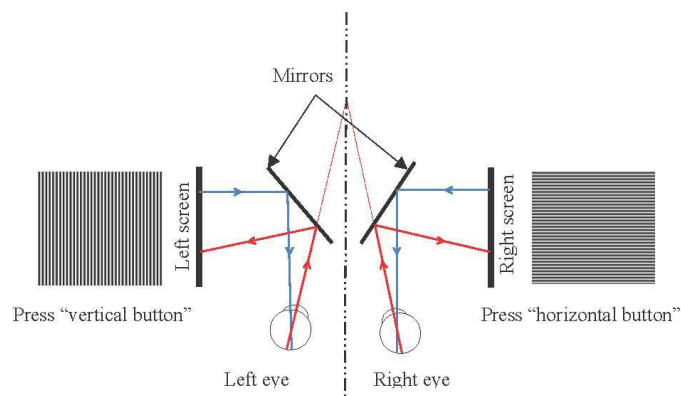


Figure 1: Stimuli presented by the mirror stereoscope

2.2.8 Motion coherence

The test was developed following Li et al.³³. The measurement was carried out under low ambient light³⁸.

Apparatus

The participant was seated in front of the same stereoscope as before and under the same conditions (*i.e.* stabilized at 0.50 m from the screen). The participant indicated what they could see via a computer keyboard.

Stimuli

Stimuli consisted of random dots (*i.e.* a random dot kinematogram)⁴⁴. One hundred light dots were displayed at 100% contrast over an average background luminance of 35 cd/m². Each dot had a radius of 0.5° and moved at a speed of 6° per second³³. The dots had a limited lifetime such that with each refresh, each dot had a 5% chance of disappearing and reappearing elsewhere³³. Dots were presented within a 9° circle; this was surrounded by a square, presented binocularly. Nonius lines and a central fixation point of 0.35° were also displayed to aid fusion³³ (Figure 2). To avoid any interaction between the stimulus dots and the central fixation point, dots did not pass through the central region (2° radius). Any dots that did pass through this region disappeared and reappeared on the other side with a delay calculated to maintain a constant speed³³. Each dot was presented for a maximum of one second, and held for 250 ms after the response, before the next test began³³.

During the test, one eye sees a population of ‘signal’ dots that all move in the same direction (to the right or left). The other eye sees a randomly moving dots cloud. The task is to identify the direction of the signal dots. A threshold of 79% correct answers (correct perception of the direction of movement) was set. The number of signal dots changed from test to test, based on a psychophysical ‘three down, one up’ staircase, with a step of 50% before the first inversion, then 25%. At the beginning of each staircase, 100 signal dots and 0 random dots were presented. As dots were removed from the signal population, they moved into the random population, and *vice versa*³³. Each staircase consisted of six inversions, and the last five inversions were averaged to obtain the threshold. During each threshold measurement, two stairs were randomly interlaced, one measuring the threshold when signal dots were presented to the left eye, and the other when they were presented to the right eye. By interlacing the stairs, participants cannot detect the eye that sees the signal dots. This measurement took about three minutes.

Procedure

First, the participant was settled in the stereoscope, and then he or she ran a familiarization test. The participant was asked to press the arrow of the keyboard to indicate the perceived direction of the dots. The perceived motion coherence threshold was calculated from the minimum number of dots necessary to detect movement for each eye. The procedure was

performed three times. The dominant eye was determined to be the eye with the lowest average threshold over the three trials³³.

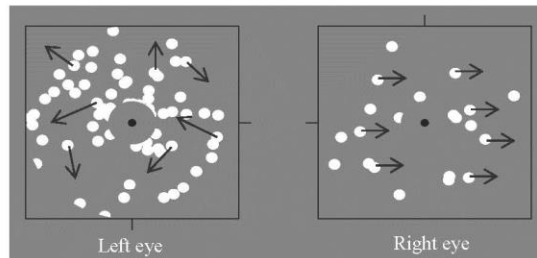


Figure 2: Stimuli used with the two eyes. Randomly moving dots were presented to the left eye and 'signal' points moving to the right were presented to the right eye.

2.3 Performance evaluation using monocular augmented reality device

We created a visual stimulus, comprising a binocular background upon which a monocular image was superimposed. The aim was to evaluate performance in target tracking, detection and identification, and subjective comfort in relation to the presenting eye. Eighteen of the 33 participants took part in this test: 12 women and 6 men aged 21–45 years (mean 32 ± 7.3).

Apparatus

The participant was seated 3.20 m from a screen (1.6 m high, 2.58 m wide) upon which two images were projected at 120 Hz using a stereoscopic video projector (Figure 3). The participant wore active Volfoni (Paris, France) occlusion glasses at 60 Hz for each eye, which provided a dedicated display to each of the two eyes. The participant also wore an eye tracker (EyeLink II, EyeLink®, Ottawa, Canada) that measured gaze position. These data are not considered in this article. The participant's head was fixed via a chin strap to ensure that it remained in the same position during each condition.

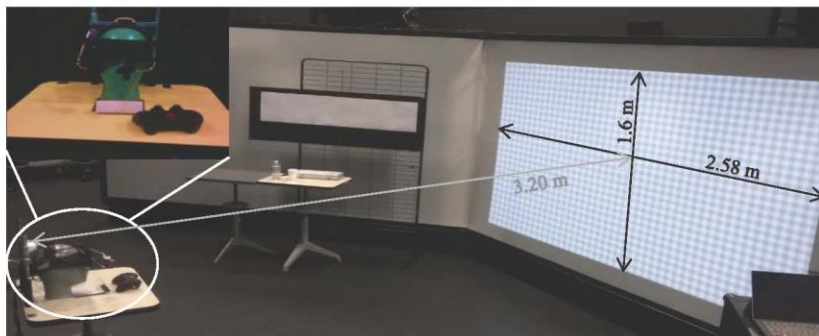


Figure 3: Picture of the experimental setup. The participant was seated at 3.20 m from a screen 1.3 m high and 2.58 m wide. He or she wore an eye tracker, occlusion glasses and used a joystick to perform the tasks of target tracking, detection and identification.

Stimuli

Stimuli were free of semantic content and context, and targets were selected that could be fully characterized in terms of spatial frequency and contrast. The binocular background was composed of vertical and horizontal sinusoidal striations on

the one hand, and a circular target that followed the movements of the background, like an runway, on the other hand (Figure 4). The sinusoidal striations facilitated motor fusion of the background. Since binocular rivalry, including in the context of monocular augmented reality, is known to be dependent on stimulus characteristics, we chose to vary the spatial frequency and contrast of the background, and the contrast of the monocular element that would be aligned with the circular target associated with the background. This monocular element took the form of a 0.7° ring, like the flight path vector (FPV) classically used in flight symbology. The background could have two spatial frequencies: 1 and 6.92 cpd. Background contrast was set at 100% (for the maximum spatial frequency condition) and 100, 60 or 20% contrast (for the minimum spatial frequency condition). The contrast of the monocular element was modified by adjusting the luminance level of the center of the circle and its contour. In particular, two contrast levels were tested by setting luminance levels to 1/0 and 0.6/0.4. The eight conditions (1 maximum spatial frequency + 1 minimum spatial frequency \times 3 background contrasts) \times 2 monocular contrasts) were tested with the monocular device placed randomly on the right or the left eye (*i.e.* 16 conditions in total).

Landolt rings to identify were displayed for between 500 and 1500 ms every 5000 to 8000 ms, on either the monocular or binocular background. All rings were displayed at high spatial frequency and 100% contrast; the aim was to ensure that their identification was only dependent on the display (binocular vs monocular). Eight rings were presented in each display condition. They were only presented in four positions (*i.e.* opening to the left, right, top or bottom) and two eccentricities (0.81° and 2° visual angle) randomly around the center of the target.

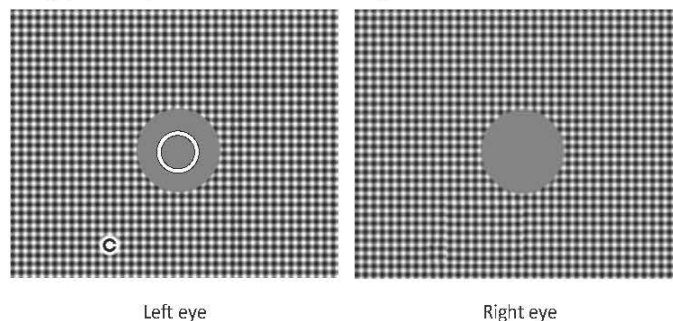


Figure 4: Representation of what was seen by the participant's left and right eye. Images can be merged by the stereoscopic equipment. The condition shown is a combination of a binocular background at 100% contrast and 6.92 cpd during the display of a monocular Landolt ring at 2° eccentricity.

Procedure

The tracking task consisted of making the center of the ring coincide with the center of the moving target, using a joystick. Performance was measured as error (in millimeters) between the center of the ring and the center of the target. At the same time, the participant was asked to indicate, as quickly as possible, the direction of opening of the Landolt ring, using the arrow keys on a game controller. The time (in seconds) between the appearance of the Landolt ring and the participant's decision was measured as the stimulus detection time. If the participant mistakenly identified the orientation of the Landolt ring, he or she could correct his or her response before the next stimulus appeared. An error was recorded when the participant's last response and the orientation of the Landolt ring were different. If the background or target information was lost, the participant could indicate this by pulling a trigger on the game controller. At the end of each condition, during a break, the participant was asked to confirm (orally) whether there was a loss of visual information from the target, ring or background. This was referred to as a *subjective loss of signal*.

2.4 Data Analysis

Five of the eight ocular dominance tests (near vision acuity, far vision acuity, hole in card, near point of convergence, and the Worth test) were characterized qualitatively. Here, +1 indicated that the right eye (RE) was dominant, -1 indicated left eye (LE) dominance, and 0 was recorded when no dominance could be identified. The remaining tests give quantitative

data. In cases where the dominant eye was the one with the highest score (blur sensitivity and form rivalry), the final result was determined by the calculation below:

$$\frac{(\text{RE score} - \text{LE score})}{(\text{RE score} + \text{LE score})}$$

For the motion coherence test, the dominant eye was determined to be the one with the lowest score, and the result was determined by the calculation below:

$$\frac{(\text{LE score} - \text{RE score})}{(\text{LE score} + \text{RE score})}$$

These quantitative data were then converted into qualitative data as a function of the sign of the result. A positive score indicated right eye dominance (+1), a negative score indicated left eye dominance (-1), and a score of zero remained unchanged. Since zero could not be recorded for some tests (hole in card, motion coherence, form rivalry), data were homogenized by calculating Z scores across all tests. These Z scores were then two-by-two compared using a Kendall correlation test^{23,33} (Table 1). Then, like Coren and Kaplan²³, we ran a factor analysis to determine whether tests could be grouped around a common factor (Table 2). The significance threshold was set at 0.5²³.

A two-factor repeated measures ANOVA was run to compare performance. The latter was measured as reaction time and identification of Landolt rings, as a function of display conditions (optimal/ degraded, binocular/ monocular).

We then determined whether the presentation of the monocular image to one eye influenced binocular rivalry and, thus, performance. A multivariate test was run for each of the dominance tests (Table 3). This took into account, in each case, target error, mean time to target detection, identification error, subjective loss of signal and subjective visual fatigue. The main factor was dominance assessed by the test. Each test either identified one eye as dominant and the other as non-dominant, or no dominance. When no dominance was detected, the participant was not included in the statistical analysis. The number of samples therefore varied, depending on the test.

Multivariate analyses were complemented by a matched-pair t-test for each of the above variables (Table 4). This compared dominant and non-dominant eyes, as determined by each of the dominance tests. Given the large number of tests, the Benjamini-Hochberg method was applied to control for the false positive rate. The corrected p-value was calculated using the formula: $\frac{p+NBp}{j}$ where p is the initial p-value, NBp is the number of tests performed and j is the rank of the initial p-value.

3. RESULTS

3.1 Classification of ocular dominance tests

The two-by-two comparison of ocular dominance tests found a significant correlation between several tests and the hole in card test (Table 1). Specifically, the hole in card test was correlated with the near vision acuity test, the near point of convergence test, and the motion coherence test. The factor analysis confirmed the grouping of these four tests under the same factor (2). Consequently, because of their link with the hole in card test (the motor test *par excellence*), all were considered to characterize motor dominance.

Otherwise, the analysis found that only far vision acuity and blur sensitivity were significantly correlated (Table 1). However, the factor analysis combined the blur sensitivity test with the near Worth test and the form rivalry test, but not the far vision acuity test, which makes up a third factor, along with the motion coherence test (2).

Table 1: Correlation matrix of ocular dominance tests (significant level $p < 0.005$)

Dominance test	1	2	3	4	5	6	7	8
1. Hole in card	-	0.440*	-0.146	0.497*	0.226	-0.027	0.465*	0.124
2. NPC		-	-0.195	0.320	-0.095	-0.242	0.340	-0.053
3. Far vision acuity			-	0.044	-0.065	0.397*	0.188	-0.278
4. Near vision acuity				-	0.300	-0.054	0.130	0.130
5. Near worth					-	0.207	-0.102	0.318
6. Blur sensitivity						-	0.136	0.237
7. Motion coherence							-	0.087
8. Form rivalry								-

Table 2: Factor Loadings on tests for ocular dominance on the three extracted factors (marked points > 0.6 and < -0.6)

Dominance test	Factor I	Factor II	Factor III
Hole in card	-0.859	-0.008	0.082
NPC	-0.669	0.460	0.135
Far vision acuity	0.213	-0.376	0.767
Near vision acuity	-0.697	-0.131	-0.030
Near worth	-0.309	-0.606	-0.425
Blur sensitivity	0.083	-0.797	0.320
Motion coherence	-0.548	-0.040	0.582
Form rivalry	-0.289	-0.501	-0.478
Variance explained	2.203	1.634	1.465
Total proportion	27.5%	20.4%	18.3%

3.2 Performance and subjective comfort

The following figure (Figure 5) is an example of tracking performance for one participant in one condition.

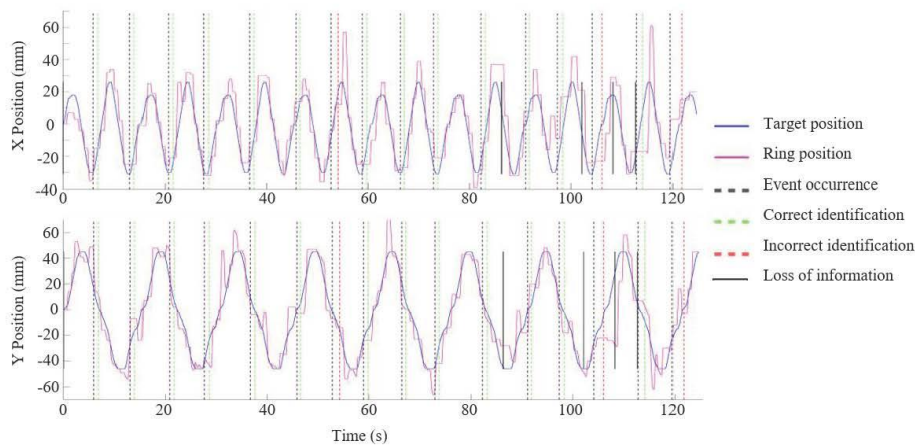


Figure 5: Graph representing x (top) and y (bottom) values of the target (blue) and the ring (purple) as a function of time for one participant, in one condition. The appearance of the Landolt rings is shown by the black dotted line, and the participant's response is shown in either green (correct), or red (incorrect). Subjective loss of signal is the point at which the participant pulled the trigger to indicate that he or she had lost information.

The two-factor repeated measures ANOVA which compared performance in terms of reaction time and Landolt rings identification, as a function of display conditions (optimal/ degraded) and display types (binocular/ monocular) highlighted a significant effect of display types, but only for reaction time ($F(1,17) = 8.5, p < 0.01$). Reaction time was faster in the binocular than the monocular condition. No effect of display conditions on performance was found.

In view of the previous results (§3.1), only dominance established by the hole in card test should be considered for motor dominance in the multivariate test. The analysis was run for each of the dominance tests by integrating all performance variables (target error, mean time to detect the Landolt ring, number of identification errors, subjective loss of signal and subjective visual fatigue). Here, the aim was to determine whether performance was a function of the dominance established by each test (Table 3).

Table 3: Multivariate test of performance for each of the dominance tests

Dominance test	<i>p</i> -value		
	All conditions	Optimal conditions (6.92 cpd – 100%)	Degraded conditions (1cpd – 20%)
Hole in card	0.824	0.759	0.516
Far vision acuity	0.583	0.455	0.798
Near Worth	0.732	0.621	0.285
Blur sensitivity	0.755	0.362	0.780
Form rivalry	0.847	0.793	0.745

None of the tests used to characterize dominance found a significant difference in performance and subjective comfort between display on the dominant or non-dominant eye, even under degraded conditions.

To complete the precedent results, a paired *t*-test for each of the performance and comfort variables was run (Table 4).

Table 4: Paired *t*-tests performed on dependent variables for the dominant and non-dominant eye as determined by each dominance test. A corrected *p*-value was calculated to avoid false positives due to the large number of tests performed.

Dominance test	Dependent variable	Dominant eye	Non-dominant eye	N	<i>p</i> -value	corrected <i>p</i> -value
		Mean ± standard deviation	Mean ± standard deviation			
Hole in card	Target error (mm)	9.962 ± 2.778	10.019 ± 2.107	18	0.717	0.854
	Reaction time (s)	0.831 ± 0.126	0.814 ± 0.121	18	0.112	0.467
	Identification error	3.833 ± 5.102	2.278 ± 1.965	18	0.207	0.370
	Subjective signal loss	2.889 ± 4.351	3.444 ± 4.592	18	0.126	0.450
	Subjective visual fatigue	0.882 ± 0.751	0.711 ± 0.717	18	0.179	0.407
Far vision acuity	Target error (mm)	10.520 ± 2.290	10.556 ± 2.539	12	0.866	0.866
	Reaction time (s)	0.863 ± 0.108	0.885 ± 0.124	12	0.098	0.613
	Identification error	2.083 ± 1.443	5 ± 5.847	12	0.080	1.000
	Subjective signal loss	3.833 ± 5.219	3.667 ± 5.297	12	0.767	0.834
	Subjective visual fatigue	0.614 ± 0.709	0.838 ± 0.732	12	0.207	0.345
Near Worth	Target error (mm)	10.124 ± 2.436	10.090 ± 2.290	12	0.835	0.870
	Reaction time (s)	0.827 ± 0.148	0.808 ± 0.139	12	0.172	0.430
	Identification error	4.167 ± 4.240	2.250 ± 2.301	12	0.168	0.467
	Subjective signal loss	3.333 ± 4.830	3.667 ± 4.812	12	0.266	0.369
	Subjective visual fatigue	1.174 ± 0.746	0.861 ± 0.734	12	0.087	0.725

Blur sensitivity	Target error (mm)	9.969 ± 2.155	10.110 ± 2.253	17	0.395	0.520
	Reaction time (s)	0.824 ± 0.120	0.836 ± 0.127	17	0.262	0.385
	Identification error	2.118 ± 1.616	4.235 ± 5.250	17	0.099	0.495
	Subjective signal loss	3.176 ± 4.586	3.353 ± 4.609	17	0.653	0.816
	Subjective visual fatigue	0.860 ± 0.718	0.816 ± 0.761	17	0.753	0.856
Form rivalry	Target error (mm)	9.834 ± 2.251	10.147 ± 2.031	18	0.033*	0.825
	Reaction time (s)	0.830 ± 0.128	0.816 ± 0.119	18	0.188	0.392
	Identification error	3.778 ± 4.894	2.333 ± 2.473	18	0.243	0.380
	Subjective signal loss	2.889 ± 4.296	3.444 ± 4.643	18	0.126	0.394
	Subjective visual fatigue	0.880 ± 0.732	0.713 ± 0.736	18	0.189	0.363

4. DISCUSSION

The objective of this study was to determine whether ocular dominance is a parameter that should be taken into consideration when using monocular augmented reality devices. We therefore began by testing the correlation between different dominance tests in order to establish whether the ocular dominance evaluated by each test was associated with a significant difference in performance and subjective comfort.

The results from the correlation matrix found that tests usually referred to as motor tests (the hole in card and NPC test) were correlated with the near vision acuity test and the motion coherence test. These results are consistent with the literature, which groups these tests as ocular motor dominance tests^{23,29,33,34,36} and confirms the findings of our earlier work⁴⁵. Thus, the four motor tests are considered to be interchangeable. Overall, studies that evaluate the impact of the presenting eye on performance and subjective comfort use the hole in card test²² or a test resembling it when the former lacks precision^{16,19} to measure ocular motor dominance. Consequently, it is the only test considered in the rest of our evaluation of motor dominance. The factor analysis supported this result, by identifying a factor common to all four tests. A second factor also emerged. This concerned the near Worth test, the blur sensitivity test and the form rivalry test. These three tests are defined in the literature as tests that measure sensory dominance. However, our study found that they are not correlated with each other which confirms, as several authors have^{23,33,46}, that they are not interchangeable and assess different components of sensory ocular dominance⁴⁵.

Performance measured as reaction time and Landolt ring identification was compared between monocular and binocular display conditions. This analysis confirmed results observed in previous studies, namely that overall performance is better in the binocular than the monocular display condition^{20,22}. However, unlike Winterbottom et al.¹⁹, we did not observe a significant fall in performance in the so-called 'degraded' display conditions (*i.e.* 1 cpd, 20%).

For all display conditions, we tested the differences in performance and subjective comfort between dominant and non-dominant eyes, determined by the hole in card test and each of the sensory tests. Neither multivariate tests nor paired *t*-tests found any effect of the presenting eye on performance measured as tracking, target detection and identification, and subjective comfort under any monocular augmented reality display condition.

Thus, while Browne et al.²² suggest that a dominance effect may be observed under degraded perceptual conditions, our results do not support their hypothesis. The lack of an impact of ocular dominance on performance and subjective comfort has already been observed in the literature^{19,21,22}. However, the latter studies only considered motor dominance. Our results show that even when a wide range of sensory tests are considered, there are no difference in performance or subjective comfort as a function of ocular dominance.

5. CONCLUSION

This study underlines that ocular dominance is a difficult concept to grasp. While motor dominance appears to be rather easy to evaluate, this is not the case for sensory tests, which seem to be very dependent on the sensory component that is evaluated. Our evaluation of motor dominance in the display of monocular information found no benefit in terms of performance or subjective comfort. This was also the case for sensory dominances. Thus, ocular dominance does not seem to play a determining role in choosing the eye to display monocular information to. In an extension to our work, we plan to focus on subjective preferences regarding the choice of eye to display monocular information, and will relate this choice to performance measured as tracking, detection and target identification in order to determine if preferences are consistent with performance.

REFERENCES

- [1] Melzer, J. E., Brozoski, F. T., Letowski, T. R., Harding, T. H. and Rash, C. E., "Guidelines for HMD design," [Helmet-Mounted Displays: Sensation, Perception and Cognition Issues], Fort Rucker, AL, 805–848 (2009).
- [2] Blake, R. and Logothetis, N. K., "Visual competition," *Nat. Rev. Neurosci.* 3(1), 13–21 (2002).
- [3] Kovács, I., Papatomas, T. V., Yang, M. and Fehér, Á., "When the brain changes its mind: Interocular grouping during binocular rivalry," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 93(26), 15508–15511 (1996).
- [4] Blake, R. and O'Shea, R. P., "Binocular Rivalry," [Reference Module in Neuroscience and Biobehavioral Psychology], Elsevier (2017).
- [5] Blake, R., Westendorf, D. H. and Overton, R., "What is suppressed during binocular rivalry?," *Perception* 9(2), 223–231 (1980).
- [6] Logothetis, N. K., Leopold, D. A. and Sheinberg, D. L., "What is rivalling during binocular rivalry?," *Nature* 380(6575), 621–624 (1996).
- [7] Leopold, D. A. and Logothetis, N. K., "Activity changes in early visual cortex reflect monkeys' percepts during binocular rivalry," *Nature* 379(6565), 549–553 (1996).
- [8] Silver, M. A. and Logothetis, N. K., "Temporal frequency and contrast tagging bias the type of competition in interocular switch rivalry," *Vis. Res.* 47(4), 532–543 (2007).
- [9] Lee, S. H. and Blake, R., "A fresh look at interocular grouping during binocular rivalry," *Vis. Res.* 44(10), 983–991 (2004).
- [10] Blake, R. and Fox, R., "Binocular rivalry suppression: Insensitive to spatial frequency and orientation change," *Vis. Res.* 14(8), 687–692 (1974).
- [11] Blake, R., Yu, K., Lokey, M. and Norman, H., "Binocular Rivalry and Motion Perception," *J. Cogn. Neurosci.* 10(1), 46–60 (1998).
- [12] Leopold, D. A. and Logothetis, N. K., "Multistable phenomena: changing views in perception," *Trends Cogn. Sci.* 3(7), 254–264 (1999).
- [13] Bonnef, Y., Sagi, D. and Karni, A., "A transition between eye and object rivalry determined by stimulus coherence," *Vis. Res.* 41(8), 981–989 (2001).
- [14] Tong, F., Meng, M. and Blake, R., "Neural bases of binocular rivalry," *Trends Cogn. Sci.* 10(11), 502–511 (2006).
- [15] Freeman, A. W., "Multistage Model for Binocular Rivalry," *J. Neurophysiol.* 94(6), 4412–4420 (2005).
- [16] Hershberger, M. L. and Guerin, D. F., "Binocular rivalry in helmet-mounted display applications," AD-AO13 838, Aerospace Medical Research Laboratory, Culver City, CA, 1–146 (1975).
- [17] O'Shea, R. P., Sims, A. J. H. and Govan, D. G., "The effect of spatial frequency and field size on the spread of exclusive visibility in binocular rivalry," *Vis. Res.* 37(2), 175–183 (1997).
- [18] Yang, Y., Rose, D. and Blake, R., "On the Variety of Percepts Associated with Dichoptic Viewing of Dissimilar Monocular Stimuli," *Perception* 21(1), 47–62 (1992).

- [19] Winterbottom, M. D., Patterson, R., Pierce, B. J. and Taylor, A., "Visual suppression of monocularly presented symbology against a fused background in a simulation and training environment," AFRL-HE-AZ-TP-2007-08, Air Force Research Lab (2006).
- [20] Patterson, R., Winterbottom, M. D. and Pierce, B. J., "Perceptual issues in the use of head-mounted visual displays," *Hum. Factors* 48(3), 555–573 (2006).
- [21] Cupero, F., Valimont, B., Wise, J., Best, C. and De Mers, B., "Head worn display system for equivalent visual operations," NASA/CR-2009-215781, Nasa, Phoenix, AR (2009).
- [22] Browne, M. P., Winterbottom, M. and Patterson, R. E., "Performance and comfort of monocular head-mounted displays in flight simulators," 2010, 76880E.
- [23] Coren, S. and Kaplan, C. P., "Patterns of ocular dominance," *Optom. Vis. Sci.* 50(4), 283–292 (1973).
- [24] Borrelli, A., Hon, G. and Zik, Y., [The Optics of Giambattista Della Porta (ca. 1535–1615): A Reassessment, Springer], Springer International Publishing (2017).
- [25] Bourassa, D. C., "Handedness and Eye-dominance: A Meta-analysis of Their Relationship," *Brain Cogn.* 1(1), 5–34 (1996).
- [26] Suttle, C., Alexander, J., Liu, M., Ng, S., Poon, J. and Tran, T., "Sensory ocular dominance based on resolution acuity, contrast sensitivity and alignment sensitivity," *Clin. Exp. Optom.* 92(1), 2–8 (2009).
- [27] Porac, C. and Coren, S., "The dominant eye," *Psychol. Bull.* 83(5), 880–897 (1976).
- [28] Porac, C., Whitford, F. W. and Coren, S., "The relationship between eye dominance and monocular acuity: an additional consideration," *American journal of optometry and physiological optics* 53(12), 803–806 (1976).
- [29] Gronwall, D. M. A. and Sampson, H., "Ocular dominance: a test of two hypotheses," *Br. J. Psychol.* 62(2), 175–185 (1971).
- [30] Cohen, J., "Eye-dominance," *The American journal of psychology* 65(4), 634–636 (1952).
- [31] Berner, G. E. and Berner, D. E., "Relation of ocular dominance, handedness, and the controlling eye in binocular vision," *AMA Archives of Ophthalmology* 50(5), 603–608 (1953).
- [32] Lederer, J., "Ocular dominance," *Clin. Exp. Optom.* 44(11), 531–574 (1961).
- [33] Li, J., Lam, C. S. Y., Yu, M., Hess, R. F., Chan, L. Y. L., Maehara, G., Woo, G. C. and Thompson, B., "Quantifying sensory eye dominance in the normal visual system: a new technique and insights into variation across traditional tests," *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* 51(12), 6875–6881 (2010).
- [34] Pointer, J. S., "Sighting versus sensory ocular dominance," *J. Optom.* 5(2), 52–55 (2012).
- [35] Ehrenstein, W., Arnold-Schulz-Gahmen, B. E. and Jaschinski, W., "Eye preference within the context of binocular functions," *Graefes Arch. Clin. Exp. Ophthalmol.* 243(9), 926–932 (2005).
- [36] Seijas, O., de Liaño, P. G., de Liaño, R. G., Roberts, C. J., Piedrahita, E. and Diaz, E., "Ocular dominance diagnosis and its influence in monovision," *Am. J. Ophthalmol.* 144(2), 209–216 (2007).
- [37] Chaumillon, R., Alahyane, N., Senot, P., Vergne, J., Lemoine, C., Doré-Mazars, K., Blouin, J., Vergilino-Perez, D. and Guillaume, A., "Vers une quantification de la dominance oculaire pour une meilleure prise en charge des pathologies de l'œil," *J. Fr. Ophthalmol.* 38(4), 322–332 (2015).
- [38] Handa, T., Mukuno, K., Uozato, H., Niida, T., Shoji, N. and Shimizu, K., "Effects of dominant and nondominant eyes in binocular rivalry," *Optom. Vis. Sci.* 81(5), 377–383 (2004).
- [39] Yang, E., Blake, R. and McDonald, J. E., "A new interocular suppression technique for measuring sensory eye dominance," *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* 51(1), 588–593 (2010).
- [40] Scheiman, M., Gallaway, M., Frantz, K. A., Peters, R. J., Hatch, S., Cuff, M. and Mitchell, G. L., "Nearpoint of Convergence: Test Procedure, Target Selection, and Normative Data," *Optom. Vis. Sci.* 80(3), 214–225 (2003).

- [41] Abraham, N. G., Srinivasan, K. and Thomas, J., “Normative data for near point of convergence, accommodation, and phoria,” *Oman J Ophthalmol* 8(1), 14–18 (2015).
- [42] Cheng, C. Y., Yen, M. Y., Lin, H. Y., Hsia, W. W. and Hsu, W. M., “Association of ocular dominance and anisometropic myopia,” *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 45(8), 2856–2860 (2004).
- [43] Kollbaum, P. S., Jansen, M. E. and Rickert, M. E., “Comparison of patient-reported visual outcome methods to quantify the perceptual effects of defocus,” *Contact Lens and Anterior Eye* 35(5), 213–221 (2012).
- [44] Mansouri, B., Thompson, B. and Hess, R. F., “Measurement of suprathreshold binocular interactions in amblyopia,” *Vis. Res.* 48(28), 2775–2784 (2008).
- [45] Bayle, E., Guilbaud, E., Hourlier, S., Lelandais, S., Leroy, L., Plantier, J., & Neveu, P. “Which Ocular Dominance Should Be Considered for Monocular Augmented Reality Devices?,” 20th International Symposium on Aviation Psychology, 379-384 (2019).
- [46] Cohen, J., “Eye-Dominance,” *Am. J. Psychol.* 65(4), 634 (1952).

Bayle E., Guilbaud E., Hourlier S., Lelandais S., Leroy L., Plantier J., Neveu P. « Binocular rivalry in monocular augmented reality devices: a review ». In : *Situation Awareness in Degraded Environments 2019* [En ligne]. *Situation Awareness in Degraded Environments 2019*. International Society for Optics and Photonics, 2019. p. 110190H.

PROCEEDINGS OF SPIE

SPIDigitalLibrary.org/conference-proceedings-of-spie

Binocular rivalry in monocular augmented reality devices: a review

Bayle, Elodie, Guilbaud, Esetelle, Hourlier, Sylvain, Lelandais, Sylvie, Leroy, Laure, et al.

Elodie Bayle, Esetelle Guilbaud, Sylvain Hourlier, Sylvie Lelandais, Laure Leroy, Justin Plantier, Pascaline Neveu, "Binocular rivalry in monocular augmented reality devices: a review," Proc. SPIE 11019, Situation Awareness in Degraded Environments 2019, 110190H (1 May 2019); doi: 10.1117/12.2518928

SPIE.

Event: SPIE Defense + Commercial Sensing, 2019, Baltimore, Maryland, United States

Downloaded From: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie> on 03 Feb 2021 Terms of Use: <https://www.spiedigitallibrary.org/terms-of-use>

Binocular rivalry in monocular augmented reality devices: a review

Elodie Bayle^{*a,b,c}, Estelle Guilbaud^a, Sylvain Hourlier^b, Sylvie Lelandais^c, Laure Leroy^d,
Justin Plantier^{a,c}, Pascaline Neveu^a

^aFrench Armed Forces Biomedical Research Institute, Brétigny-sur-Orge, France; ^bThales AVS France SAS, Mérignac, France; ^cIBISC, Evry University, Paris Saclay University, Evry, France;

^dParis 8 University, Saint-Denis, France

ABSTRACT

This review aims to clarify the parameters affecting binocular rivalry, in order to improve comfort for users of monocular augmented reality devices. Augmented reality devices allow users to see virtual information superimposed on the environment. The particularity of monocular systems is that they do not stimulate the eyes in the same way and can therefore induce binocular rivalry. This occurs when the brain is unable to merge the different images presented to each eye and perception alternates between them. It can cause visual fatigue, headache and visual suppression. Binocular rivalry can be characterized in terms of alternation rate, predominance (i.e. total proportion of the binocular rivalry viewing time that a stimulus is dominant) and average dominance duration (for all individual dominance periods). The literature suggests that these variables depend on the conditions of use and the visual stimuli available to the subject. Notably, several parameters have an impact, including contrast, spatial frequency, brightness, etc. The impact of other parameters, such as ocular dominance, remains the subject of debate. With respect to the latter, the literature describes various definitions and tests, and it appears that there are three main forms: motor, acuity and sensorial, the latter being of interest for binocular rivalry.

Keywords: Binocular rivalry, monocular augmented reality device, ocular dominance, attention.

1. INTRODUCTION

The subject of this review concerns optical see-through augmented reality devices. In these devices, a virtual image is projected via a helmet in front of one of the user's two eyes onto a semi-transparent screen situated between the viewer and their environment¹. This type of device is typically used in aviation to give the pilot faster access to information from night vision sensors, or data usually found on the Primary Flight Display such as the artificial horizon, aircraft speed, altitude, etc. The set of information supplied directly to the pilot's eyes is known as symbology. It is possible to display a simulated runway using infrared sensors located under the nose of the aircraft to facilitate manoeuvres in degraded environmental conditions (*i.e.* fog, night, heavy rain). Symbology is controlled in real time by the position of the pilot's head, enabling him or her to keep all relevant information in view, even when the head is turned. This advantage distinguishes the Helmet-Mounted Display (HMD) from the Head-Up Display (HUD), which is fixed in the cockpit². The advantage of monocular helmet displays is that the single image source reduces the weight of equipment and is more easily adjustable than binocular equipment³.

The first monocular augmented reality helmet used in the defence environment was the Integrated Helmet And Display Sight System (IHADSS), which was integrated into the Apache AH-64 attack helicopter⁴. This monocular device displays the virtual image on the right eye, and provides support for night vision imagery (thanks to a camera placed at the front of the helicopter), symbology from day and night navigation instruments, and information on weapon delivery systems (Figure 1). During night flight, the IHADSS is not a transparent device, as the infrared image masks the right-eye environment. It was, nevertheless, a precursor for head-mounted augmented reality systems. However, the evaluation of the system presented by Hale and Piccione⁵ cited by Rash et al.⁴ noted an increase in workload, notably visual and mental fatigue, and stress. Pilots reported that they sometimes had to close one eye to focus their attention either on the scene of interest or on information presented to the augmented reality eye. One cause of this asthenopia relates to binocular rivalry. Specifically, visual perception is disturbed because the projected image is enslaved to the movement of the head, and is only presented in front of one eye⁶. The two eyes are not stimulated in the same way, creating competition between the two representations⁷.

*elodie.bayle@fr.thalesgroup.com

Situation Awareness in Degraded Environments 2019, edited by John N. Sanders-Reed, Jarvis J. Arthur III,
Proc. of SPIE Vol. 11019, 110190H · © 2019 SPIE · CCC code: 0277-786X/19/\$18 · doi: 10.1117/12.2518928

Proc. of SPIE Vol. 11019 110190H-1

Downloaded From: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie> on 03 Feb 2021
Terms of Use: <https://www.spiedigitallibrary.org/terms-of-use>



Figure 1. Integrated Helmet and Display Sighting System (IHADSS) used by United States Army Apache AH-64 pilots

Whether it concerns faces, colours or lines, binocular rivalry arises as soon as disparate (dichoptic or dichotic) images are presented to the eyes. Perception alternation is function of image characteristics, and is unpredictable over time, suggesting that dynamic neural processes are involved⁸. Although the effect of attention is not fully established, this alternation cannot be prevented, suggesting that binocular rivalry is not totally under the voluntary control of the observer.

Historically, binocular rivalry has been defined as a phenomenon in which perception alternates between images presented to each eye. It was thought to be created by inhibitory interactions between monocular neuron groups innervated by each eye (the lateral geniculate body or layer IV of the primary cortex)⁹⁻¹². Thus, it was thought that it is the competition between the two monocular sources which impacted perception. However, it was quickly shown that alternating perceptions could be manipulated by stimuli such as a change in contrast or density of contours, etc.¹³, cited by ¹⁴⁻¹⁶. In addition to the physical characteristics of stimuli, it has been shown that binocular rivalry is a function of the interpretation of the stimuli that are presented, and that it is related to a neural process found at a higher level in the cortex¹⁷⁻¹⁹.

2. IMPACT OF BINOCULAR RIVALRY

A study comparing the use of monocular, biocular and binocular night vision goggles (NVGs) showed that performance in target detection tasks tended to be better in monocular than in bio or binocular conditions²⁰. However, in the context of NVGs' use, contrast and luminance of the monocular image are much greater than that perceived by the other eye. Thus, in these conditions, there is little competition between the two eyes.

Studies of conditions where there is greater competition between the right and left images have highlighted some problems related to monocular augmented reality devices. Thus, Brown et al.²¹ observed better binocular than monocular performance in a target detection task run in a flight simulator, measured as pilot reaction time. This study did not look specifically at NVGs, but flight symbology directly superimposed on the binocular environment. Nevertheless, it showed that with training, reaction times for both devices decreased and that after six days the performance in the two conditions became more similar. Other work has found that binocular rivalry can lead to asthenopia, with symptoms such as headaches, ocular tightness and nausea in flight situations^{22,23}.

Two phenomena can emerge in the context of binocular rivalry. The image captured by one eye can be completely suppressed^{8,23}, or the right and left eye images can be seen alternately^{16,24-26}. This is referred to as bistability⁸. Alternance is particularly observed for small stimuli (less than 2° viewing angle), while larger stimuli will tend to generate a mixed image simultaneously composed of patches of the left and right stimulus that appear as a mosaic^{17,26} (Figure 2). The change in perception is not instantaneous but transitory²⁷. It takes an average of 200 ms to initiate perceptual alternation²⁷. After this time, perception alternates randomly over time. Although it has been presumed that perceptual alternation is induced by a neural adaptation to the stimulus at an early stage⁹ it is possible that this is not the case and, instead, neural adaptation encodes the dominant stimulus. Consequently, adaptation weakens the dominance, and supports recovery of the suppressed stimulus. This continues until the balance is reversed, triggering an alternation in perception^{28,29}.



Figure 2. Example of mosaic perception (B) seen when large, dichoptic stimuli (A) ($6 \times 6^\circ$) are presented¹⁷.

The dynamics of binocular rivalry are measured in three ways: i) the alternation rate, which corresponds to the number of alternate perceptions in a given time window (*e.g.* 10 alternations in 1 minute); ii) predominance, which corresponds to the total proportion of time during which a stimulus was dominant (*e.g.* 30% of the time a stimulus was predominant); and iii) average duration of dominance, which corresponds to the average duration of periods of dominance (*e.g.* 4 seconds). Typically, binocular rivalry is measured by asking a participant to press a button corresponding to the exclusive perception of an image (Figure 3).

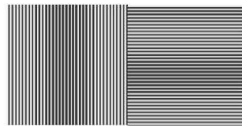


Figure 3. Example of dichoptic image presentation in binocular rivalry. The participant is asked to indicate which pattern is seen exclusively by pressing a button corresponding to that image.

Some studies use these three response options, together with a mixed perception measure when no button is pressed^{18,30,31}. Rivalry can be studied over a short period of time (200–500 ms) to examine initial dominance³² (*i.e.* the first image perceived exclusively), or over a longer period of time (> 500 ms), to examine the dynamics of binocular rivalry.

3. IMPACT OF OCULAR DOMINANCE

Binocular rivalry has historically been perceived as due to competition between the two eyes. This hypothesis argues that it is resolved at the monocular level, perhaps by adaptive reciprocal inhibition between pools of V1 cells, which creates competition at an early stage between monocular visual pathways⁹. This view is supported by behavioural studies that show that a rival stimulus can go completely unnoticed for several seconds when changes are made during suppression phases. This finding implies that suppression is not a function of the interpretation of the stimulus^{33–35}. In Blake et al. study³⁶ participants were presented with a stimulus in front of each eye. Once binocular rivalry was established, if a sudden change of stimuli was introduced, the dominant eye remained the same. The authors argued that their findings are evidence of competition between two monocular sources rather than stimulus rivalry^{9,36}. Medical imaging research has investigated these claims by evaluating activity in the primary visual cortex in a binocular rivalry situation. In Haynes et al. study³⁷, participants used red/blue anaglyph glasses to view an orthogonal red pattern in the left eye and an orthogonal blue pattern in the right eye while both stimuli were simultaneously rotated clockwise (Figure 4).



Figure 4. Left and right stimuli used by Haynes et al.³⁷.

They were asked to indicate, by pressing a key, which pattern they perceived during a five-minute stimulation period, while high-resolution functional magnetic resonance imaging (fMRI) was performed. This found that some areas of the lateral geniculate body are activated or deactivated in parallel with the perception or suppression of the stimulus (Figure 5).

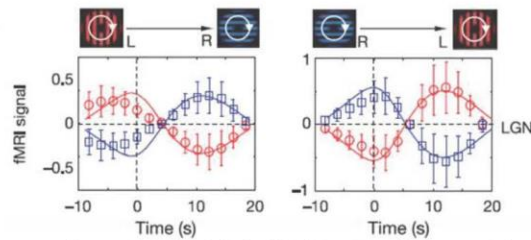


Figure 5. The Bold Oxygen Level Dependent signal obtained by fMRI. Transitions seem to be consistent with the visual perception of each pattern³⁷.

In humans, the lateral geniculate body has been found to be at the origin of visual processing involving, in particular, ocular dominance and suppression³⁷. Other fMRI studies^{10,11} also provide support for the show a correlation between changes in V1 activity and observed perceptual changes.

Similarly, O'Shea et al.³⁸ used EEGs to show that high activity in low-level neurons is found when processing rival stimuli. The study established a situation where rival dichoptic stimuli were presented to both eyes for 1 s. One eye was presented with horizontal bars, and the other with vertical bars. Then, all bars were removed for 200 ms, leaving a black background and information allowing fusion, such as a central fixation point. Then the same stimuli were presented once again for 1 s (Figure 6). Participants were asked about their perception of the orientation of the dominant stimulus before and after the 200 ms gap, and whether this orientation changed between the two presentations. They were also able to give no answer if they thought that both stimuli were equally dominant. EEG results showed that when stimuli were dichoptic and participants' perceptions changed, electrodes placed on the parieto-occipital and occipital lobe were active 180 ms after the first presentation (Figure 7). Although these results help us to predict if ocular conflict will occur, they tell us little about the dynamics of binocular rivalry.

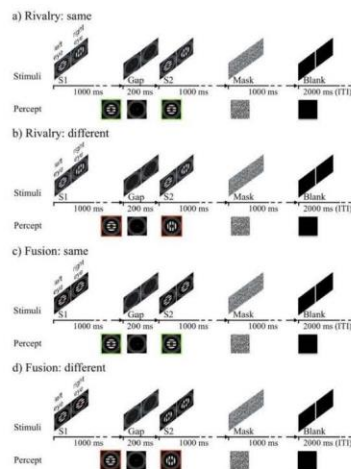


Figure 6. Sequence of events under two experimental conditions of fusion and rivalry. In the fusion condition, the display of stimuli can change between before and after the gap. In the rivalry condition, the stimuli do not change but it is the participant percept of the dominant stimulus that can change before and after the gap³⁸.

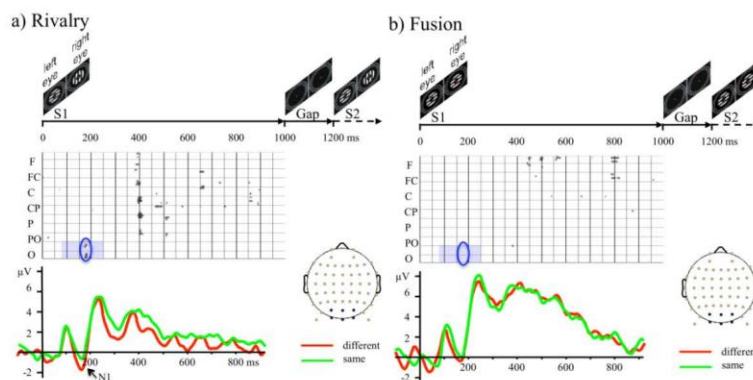


Figure 7. Illustration of measurements of potential evoked in different zones, including the occipital cortex (indicated in blue)³⁸.

Given the extent of the literature that supports competition between the two eyes, it seems relevant to try to identify whether one eye massively dominates perception with respect to the other. The results of studies using monocular HMD devices are inconclusive. On the one hand, binocular rivalry is reduced by placing the device on the dominant eye²³, but on the other hand, no change in user performance is found³⁹. In these two studies, the authors draw upon the concept of the sighting dominant eye.

Eye dominance has been the subject of a long-standing debate. Initially, it was thought to reflect the general laterality of the body. This was the hypothesis put forward in the first study, carried out in 1593 by Porta (cited in⁴⁰ and reviewed

by⁴¹). However, it has since been demonstrated that sighting dominance is uncorrelated with other physical lateralities such as the dominant hand and/or foot⁴². In fact, laterality is linked to the dominance of the contralateral cerebral hemisphere (the left hemisphere is dominant in right-handed people for example⁴⁰, while the optic nerve fibers of both eyes undergo a semi-decussation in the optic chiasma. The fibers of each optic nerve are therefore present in both cerebral hemispheres^{40,43-45}. Ocular dominance, therefore, unlike other body dominance, cannot reflect the dominance of a cerebral hemisphere.

There is little agreement in the scientific community on the definition of ocular dominance, and there are few studies on the subject. The many definitions go hand-in-hand with the multitude of ways to determine it, which together contribute to a lack of clarity. The most important work on the topic reports three principal types of dominance^{31,40,45-53}: *ocular acuity dominance*, which defines the dominant eye as the one with the best capacity for discrimination^{40,44-47,54}; *ocular alignment dominance*, also called the sighting eye, which refers to the eye chosen unconsciously when performing a monocular task such as aligning a near object with a distant object^{40,46-50,54}; and *sensory ocular dominance*, which defines the dominant eye in a binocular rivalry situation^{40,43,45,48,49,51,55}.

Monocular augmented reality devices create binocular rivalry. It is therefore relevant to refer to sensory ocular dominance in order to determine which eye to place the imager in front of. However, the two studies^{23,39} analysed the performance of aircraft pilots equipped with monocular HMDs in terms of ocular sighting dominance, rather than sensory ocular dominance. To date, there has been no study to determine whether sensory ocular dominance has an impact on in-flight pilot performance.

4. IMPACT OF STIMULI CHARACTERISTICS

Although there is a considerable body of literature that supports the existence of competition between the two eyes, some researchers have argued that competition between stimuli impacts binocular rivalry. Thus, for example, Logothetis et al.¹⁸ then Silver and Logothetis¹⁹ argued that rapid switching of the stimuli between the two eyes should lead to a rapid change in perception when orthogonal patterns with different orientations are presented in front of each eye. However, they found that perceptual change was slow, implying that alternations cannot be due to rivalry between the eyes. This suggests that binocular rivalry could, ultimately, be a high-level phenomenon that extends beyond monocular processing⁵⁶. Thus, rival targets of different shapes and colours can create combinations in which the colour of the image in one eye combines with the shape of the image in the other eye, temporarily creating a binocular impression that does not correspond to any monocular component^{57, cited by 6}. This 'interocular grouping' during rivalry is evidence against the hypothesis of ocular competition¹⁷.

However, the results of Logothetis et al.¹⁸ were challenged by Kovács et al.¹⁷, which argued that the emergence of binocular rivalry was simply initiated by ocular suppression, and that the latter's inertia prevented synchronization of the alternation of perception with the alternation of stimuli. Similarly, Lee and Blake⁵⁸ questioned the Logothetis et al.'s methodology arguing that even if 'ocular' rivalry was really present, participants would not have been able to answer accurately given the frequency of alternation (three per second). They claimed instead that the apparent contradiction was due to the existence of different types of rivalries. Furthermore, they noted that the rivalry induced by the rapid alternation of stimuli only occurred in a very limited range of spatial and temporal frequencies, suggesting that it was a special case.

The main objective of binocular rivalry studies is to determine how changes in perception relate to stimuli parameters. Typically, physical characteristics of dichoptic stimuli are varied, while evaluating the alternation rate and/or predominance and/or average duration of dominance. Although these parameters are a function of the individual¹⁶, in general, the selected image has a more-or-less significant impact.

Hershberger and Guerin²³ examined the relationship between the use of a semi-transparent monocular augmented reality device and binocular rivalry. They reported that seven parameters influenced binocular rivalry: 1) higher device contrast (21.9 compared to 4.6); 2) higher device luminance (8 fL (foot-Lamberts) compared to 0.28 fL); 3) lower scene luminance (0.28 fL compared to 8 fL); 4) better device resolution (630 compared to 165); 5) a smaller device field of view (15° compared to 45° viewing angle); 6) scene complexity (low compared to high); and 7) longer accommodation distance of the monocular device (infinite compared to 30 inches) induced less binocular rivalry.

Other studies confirm the influence of stimuli characteristics on initial dominance, predominance and alternation rate. Wolfe²⁷ showed that two dichoptic stimuli with higher luminance (2.6 log units) subjectively increased binocular rivalry compared to lower luminance (0.6 log units). In addition, the study found that stimuli with higher spatial frequencies (16.4 cycles.deg⁻¹) were subjectively merged more often than those with lower spatial frequencies (3.8 cycles.deg⁻¹). These results were quantitatively confirmed in O'shea study⁵⁹, where participants are asked to indicate their perception by pressing a button. When the participant only saw horizontal bars, they pressed the right-hand button. When they only saw vertical bars, they pressed the left-hand button, and when a mix of the two was perceived, they did not press either button. Measures included the cumulative time of exclusive perception, the number of buttons pressed per minute, and the mixed perception time. Six spatial frequencies were tested (0.5, 1, 2, 4, 8 or 16 cycles.deg⁻¹). The results showed that high spatial frequencies were consistent with more mixed perceptions than low spatial frequencies. Several stimuli diameters (0.5, 1, 2, 4 or 8°) were also tested and it was found that larger stimuli were consistent with more mixed perceptions. Other work that has compared pairs of stimuli has found that those with high contrast are consistent with a higher alternation rate than those with lower contrast^{15,60}.

When the two images differ in terms of contrast, the one with most contrast dominates and the alternation rate increases compared to the condition where the contrast of the two images is the same^{13, and 16, cited by 61}. Similarly, the brightest stimulus will dominate⁶² and a moving stimulus will dominate over a stationary stimulus^{63,64}. These cases should be considered when using a monocular augmented reality device where the two eyes do not receive images with the same characteristics. Furthermore, image predictability affects initial dominance. A stimulus that has been seen before will dominate over another that has not⁶⁵. Hollins and Leung^{57, cited by 61} showed that color also affects binocular rivalry. Thus, the exclusive visibility of blue stimuli (455 nm) was low (higher mixed rivalry) and the effect became more apparent as the colour difference between two stimuli increased (less mixed perception).

5. THE IMPACT OF ATTENTION

"Attention [...] is the taking possession by the mind, in clear and vivid form, of one out of what seem several simultaneously possible objects or trains of thought [...] It implies withdrawal from some things in order to deal effectively with others"⁶⁶.

Perceptual alternation could result from a high-level process that allows the brain to constantly re-evaluate sensory information in order to update perception^{67,68}. The parietal lobe is responsible for integrating information from different sensory modalities, such as vision, and this region is particularly involved in the perception of space and attention⁶⁹.

The debate about the existence of a link between attention and binocular rivalry has its roots in early research on rivalry. Indeed, Helmholtz⁷⁰ claims that binocular rivalry depends on both voluntary and involuntary attention. On the other hand, Hering⁷¹ considers the phenomenon to be totally dependent on low-level stimuli properties such as spatial frequency^{23,27,59,60,72} and contrast^{15,55,60,62,73}, which have been shown to have an influence. Hering⁷¹ and Breese⁷⁴ found that when presenting dichoptic stimuli to induce binocular rivalry, maintaining attention on a stimulus did not increase its predominance. More recent studies have therefore sought to show whether attention could impact the initial predominance of a stimulus and/ or the dynamics of binocular rivalry.

5.1. Voluntary control or endogenous attention

Endogenous attention refers to attention that is directed and controlled by the individual. In the case of dichoptic stimuli, the latter voluntarily tries to maintain their perception of one stimulus rather than another.

Following Helmutz⁷⁰, Meng and Tong⁷⁵ showed that voluntary attention can change the dynamics of binocular rivalry. When participants were asked to focus on a large stimulus (5.3°), the alternation rate increased compared to a condition where they passively viewed it (Figure 8).

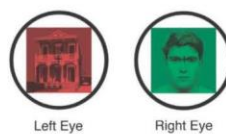


Figure 8. Rival stimuli presented in a stereoscope, showing a red house (to the left eye) and a green face (to the right eye)⁷⁵.

In addition, when participants were asked to voluntarily increase their alternation rate, it increased significantly. Nevertheless, the duration of normalized dominance (calculated by dividing the duration of each reported perception by the average duration of dominance) is not significantly modified in the voluntary attention compared to the passive attention situation. The authors concluded that voluntary attention can impact the alternation rate but cannot help to select a stimulus.

Ooi and He⁷⁶ found slightly different results, as they observed an increase in the predominance of a stimulus when voluntary attention was directed at it. The images used in Ooi and He⁷⁶ (Figure 9) are, however, very different from those used in Meng and Tong⁷⁵ the conflict is dynamic, very short-lived, limited to a small area of the visual field.

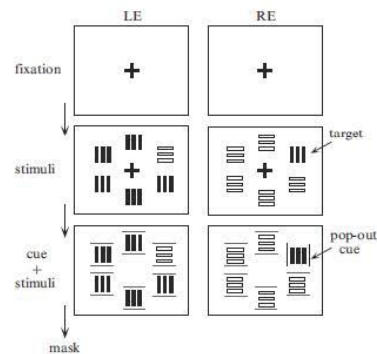


Figure 9. Example of stimuli used by⁷⁶ to determine if there is an impact of exogenous attention on change in perception during binocular rivalry.

Chong and Blake⁷⁷ examined initial dominance in a task that involved directing voluntary attention during the brief presentation (250–500 ms) of dichoptic stimuli. The stimulus consisted of striations at $\pm 45^\circ$ constituting a grating. The experiment was divided into two phases. The first used dioptic vision (right and left side gratings were identical). Here, the participant was asked to focus on one of the orientations of the grating (*i.e.* $+45^\circ$ or -45°), called the target stimulus. Their spatial orientation and frequencies were then changed for five seconds before a one second recovery period, during which the participant was asked to indicate the orientation of the target stimulus. In the second phase, two rival stimuli (*e.g.* turned $+45^\circ$ to the right or -45° to the left), with spatial frequency identical to that at the end of the first phase, were presented for 250 or 500 ms. The subject was then asked to indicate the orientation of the target stimulus, or whether he or she had perceived a mixed image (Figure 10).



Figure 10. Example of mixed perception induced by presenting horizontal bars on one eye and vertical bars on the other eye.

The results showed that, in the binocular rivalry phase, participants perceived the target stimulus more often than the other when they had successfully followed the target stimulus during the dioptic phase. When participants failed to follow the target stimulus during the dioptic phase, they mostly perceived a mixture of the two stimuli (Figure 11). The authors explained this finding in terms of losing sight of the target stimulus rather than a redirection of attention to the second orientation. They also argued that only the attentional state during the last, dioptic, phase influenced initial dominance.

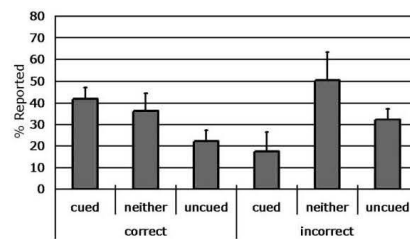


Figure 11. Percentage of perceptions reported by participants during the presentation dichoptic stimuli for 250 and 500 ms, when the orientation of the target stimulus was correctly identified⁷⁷.

The literature suggests that endogenous attention can modify initial dominance⁷⁷, alternation rate⁷⁵ and predominance⁷⁶ under certain conditions.

5.2. Involuntary control or exogenous attention

Exogenous attention is characterized by the presence of external cues that automatically activate attention processes. Ooi and He⁷⁶ showed that involuntary attention to a suppressed stimulus stops suppression and makes it dominant. Paffen and Van der Stigchel⁷⁸ showed that partial suppression increases the effective contrast of images, increasing the probability of alternation at this location. Involuntary attention can, they argue, initiate perceptual alternation.

Mitchell et al.⁷⁹ noted that binocular rivalry and attention are information selection processes. Their experiment consisted of presenting two sets of points (a and b to the right eye, and a' and b' to the left eye), one turning clockwise (a and a' for example) and the other counter-clockwise (b and b' for example) for 750 ms (Figure 12). Then, for a period of 150 ms, 60% of a set of each eye (e.g. a and a') moved in one of the eight directions, while the remaining 40% moved in one of the other seven directions. The other sets continued to rotate (b and b'). Participants were asked to indicate the direction of translation throughout the trial. After the translation, the four sets were rotated again for 150 ms. Finally, in order to generate rivalry, only one of the two sets was maintained in front of each eye (a' and b, or a and b') for durations ranging from 150 to 1850 ms (in order to study initial dominance and predominance) before they, in turn, disappeared. Participants were asked to indicate the direction of rotation of the stimulus at the end of the trial when possible (clockwise, counter-clockwise, don't know). The results showed that the point surface that was translated, and which was therefore the focus of attention, was the one that was dominant at the end of the test. The authors concluded that attention and rivalry are based on object-induced selection mechanisms and involve a "common competitive mechanism". Furthermore Chong and Blake⁷⁷ notes, based on Ooi and He⁷⁶ and Mitchell et al.⁷⁹ that exogenous attention has no effect on dichoptic stimuli presented for more than 400 ms.

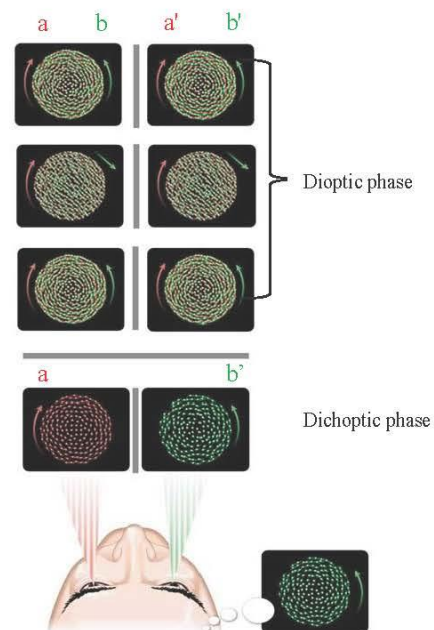


Figure 12. Procedure used in Mitchell et al.⁷⁹ to analyse the impact of exogenous attention on binocular rivalry. Lines correspond to a phase of stimuli presentation. In the dioptic phase the same images are presented to both eyes. This is followed by the dichoptic phase that involves binocular rivalry. The colour of the dots was not part of the experiment; it is shown here to clarify the method.

5.1. The impact of inattention

Brascamp and Blake⁸⁰ found that alternations stop when attention is withdrawn from stimuli. In their study, voluntary attention that is given to dichoptic stimuli produces activity in the retinotopic areas V1, V2 and V3; this is limited to V1 when attention is diverted to a letter recognition task that does not induce binocular rivalry. These findings are drawn upon Zhang et al.⁸¹ which also showed, using EEGs and physiological markers of binocular rivalry, that when attention is voluntarily diverted from dichoptic stimuli, the phenomenon ends.

6. BINOCULAR RIVALRY MECHANISMS IN MONOCULAR AUGMENTED REALITY DEVICES

While binocular rivalry and the factors influencing it have been widely studied, research typically uses dichoptic stimuli. However, it should be noted that when using a monocular augmented reality device, the right and left images are identical, except for the monocular area dedicated to the augmented reality image. Therefore, the stimulus we are interested in is very different to those usually used in binocular rivalry studies. Nevertheless, the stimuli described by Blake and Logothetis⁸ have similarities to those of monocular augmented reality devices. They explain that when a monocular zone competes with a coherent binocular background, the coherent background predominates. Thus, in the case of a monocular augmented reality image that is presented on a textured binocular background, there is a risk that the monocular zone is dominated by the binocular image and that the monocular information is not perceived. However, in aviation, the monocular zone is not completely in competition with the background as some of the information (such as

horizon for example) are coherent with the background. This aspect can minimize the effect observed by Blake and Logothetis⁸.

Various monocular augmented reality devices are available on the market, and various studies have examined binocular rivalry during exposure. For example, Witterbottom et al.⁷ show that the percentage of correct responses in a letter identification task declines by 11% when using the device, and that reaction time is 22% longer than in a control situation without rivalry. They also indicate that performance is poorer with dichoptic stimulation than with a monocular augmented reality image on a textured binocular background, which suggests that binocular rivalry is lessened with augmented reality devices compared to classical binocular rivalry stimuli.

There is few literature on the subject. Thus, the question regarding whether the factors that influence binocular rivalry and visual performance are the same under both conditions remains unanswered.

7. CONCLUSION

It has been demonstrated that the monocular neurons in the lateral geniculate nucleus play a primary role in both initial dominance and dynamics through their mutual adaptation over time^{8,10,11,22,33,37,67}. Nevertheless, visual processing induced by the presentation of dichoptic stimuli could also operate at a high level, notably due to the fact that attention has an impact on initial dominance^{18,78,80} and the dynamics of rivalry^{75,77}. Thus, some authors argue that binocular rivalry could, in the end, be equivalent to multiple low- and high-level processes in the visual perception system^{8,33,67,82,83}.

The hypothesis presented in Blake and O'shea³³ appears to define binocular rivalry as a set of processes, each with its own stimulation factors and neural consequences, but all part of the same network. They argue that rivalry occurs under certain conditions that are related to the stimulus but, once triggered, it is not known whether a change in perception is initiated by the physical difference between the two images or by the interpretation of the stimulus.

All the parameters that impact binocular rivalry must therefore be taken into account when using monocular augmented reality devices, in order to limit adverse effects. Nevertheless, most studies use stimuli that are unlike those used in such devices, where monocular symbology is superimposed on the binocular environment. Future research should determine whether the factors that influence binocular rivalry are found in both conditions.

8. REFERENCES

- [1] Rolland, J. P., Holloway, R. L. and Fuchs, H., "Comparison of optical and video see-through, head-mounted displays," presented at Photonics for Industrial Applications, 1995, Boston, MA, 293–307.
- [2] Velger, M., [Helmet mounted displays & sights, illustrated], Artech House, Boston, MA (1998).
- [3] Melzer, J. E., Brozowski, F. T., Letowski, T. R., Harding, T. H. and Rash, C. E., "Guidelines for HMD design," [Helmet-Mounted Displays: Sensation, Perception and Cognition Issues], Fort Rucker, AL, 805–848 (2009).
- [4] Rash, C. E., McLean, W. E., Mora, J. C., Ledford, M. H. and Mozo, B. T., "Design Issues for Helmet-Mounted Display Systems for Rotary-Wing Aviation," Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, VA (1998).
- [5] Hale, S. and Piccione, D., "Pilot assessment of the AH-64 helmet mounted display system," 307–312 (1989).
- [6] Patterson, R., Winterbottom, M. D. and Pierce, B. J., "Perceptual issues in the use of head-mounted visual displays," *Hum. Factors* 48(3), 555–573 (2006).
- [7] Winterbottom, M., Patterson, R., Pierce, B., Covas, C. and Rogers, J., "Binocular rivalry and attention in helmet-mounted display applications," presented at Human Factors And Ergonomics Society, 2007, San Francisco, CA, 2061–2065.
- [8] Blake, R. and Logothetis, N. K., "Visual competition," *Nat. Rev. Neurosci.* 3(1), 13–21 (2002).
- [9] Blake, R., "A neural theory of binocular rivalry," *Psychol. Rev.* 96(1), 145 (1989).
- [10] Polonsky, A., Blake, R., Braun, J. and Heeger, D. J., "Neuronal activity in human primary visual cortex correlates with perception during binocular rivalry," *Nat. Neurosci.* 3(11), 1153–1159 (2000).
- [11] Tong, F. and Engel, S. A., "Interocular rivalry revealed in the human cortical blind-spot representation," *Nature* 411, 5 (2001).
- [12] Verhoeff, F. H., "A new theory of binocular vision," *Arch Ophthalmol* 13(2), 151–175 (1935).
- [13] Blake, R. and Camisa, J., "Is binocular vision always monocular?," *Science* 200(4349), 1497–1499 (1978).

- [14] Howard, I. P. and Rogers, B. J., [Perceiving in Depth: Volume 2 Stereoscopic Vision], Oxford University Press (2012).
- [15] Hollins, M., "The effect of contrast on the completeness of binocular rivalry suppression," *Percept. Psychophys.* 27(6), 550–556 (1980).
- [16] Levelt, W. J. M., "On binocular rivalry" (1965).
- [17] Kovács, I., Papatomas, T. V., Yang, M. and Fehér, Á., "When the brain changes its mind: Interocular grouping during binocular rivalry," *Proc. Natl. Acad. Sci. Unit States Am.* 93(26), 15508–15511 (1996).
- [18] Logothetis, N. K., Leopold, D. A. and Sheinberg, D. L., "What is rivalling during binocular rivalry?," *Nature* 380(6575), 621–624 (1996).
- [19] Silver, M. A. and Logothetis, N. K., "Temporal frequency and contrast tagging bias the type of competition in interocular switch rivalry," *Vision Res.* 47(4), 532–543 (2007).
- [20] Angel, H., Tack, D. W., Bossi, L. and Tang, D., "A comparison of monocular, biocular and binocular night vision goggles with and without laser aiming devices for engaging targets in a bush-lane," DRDC Toronto CR 2004-172, Department of national defense, Toronto, CA (2004).
- [21] Browne, M. P., Winterbottom, M. and Patterson, R. E., "Performance and comfort of monocular head-mounted displays in flight simulators," 23 April 2010, 76880E.
- [22] Capo-Aponte, J. E., Temme, L. A., Task, H. L., Pinkus, A. R., Kalich, M. E., Pantle, A. J. and Rash, C. E., "Visual perception and cognitive performance" (2009).
- [23] Hershberger, M. L. and Guerin, D. F., "Binocular rivalry in helmet-mounted display applications," AD-AO13 838, Aerospace Medical Research Laboratory, Culver City, CA, 1–146 (1975).
- [24] Häkkinen, J., "A virtual display for mobile use," *Society for Information Display* 35, 1586–1589 (2004).
- [25] Alais, D. and Blake, R., "Grouping visual features during binocular rivalry," *Vision Res.* 39(26), 4341–4353 (1999).
- [26] Blake, R., O'Shea, R. P. and Mueller, T. J., "Spatial zones of binocular rivalry in central and peripheral vision," *Vis. Neurosci.* 8(5), 469–478 (1992).
- [27] Wolfe, J. M., "Influence of spatial frequency, luminance, and duration on binocular rivalry and abnormal fusion of briefly presented dichoptic stimuli," *Perception* 12(4), 447–456 (1983).
- [28] Alais, D., Cass, J., O'Shea, R. P. and Blake, R., "Visual sensitivity underlying changes in visual consciousness," *Curr. Biol.* 20(15), 1362–1367 (2010).
- [29] Reynolds, J. H. and Chelazzi, L., "Attentional modulation of visual processing," *Annu. Rev. Neurosci.* 27, 611–647 (2004).
- [30] Dieter, K. C., Sy, J. L. and Blake, R., "Individual differences in sensory eye dominance reflected in the dynamics of binocular rivalry," *Vision Res.* 141, 40–50 (2017).
- [31] Handa, T., Uozato, H., Higa, R., Nitta, M., Kawamori, T., Ishikawa, H., Shoji, N. and Shimizu, K., "Quantitative measurement of ocular dominance using binocular rivalry induced by retinometers," *J Cataract Refract Surg* 32(5), 831–836 (2006).
- [32] Stanley, J., Forte, J. D., Cavanagh, P. and Carter, O., "Onset rivalry: the initial dominance phase is independent of ongoing perceptual alternations," *Front Hum Neurosci* 5 (2011).
- [33] Blake, R. and O'Shea, R. P., "Binocular Rivalry," [Reference Module in Neuroscience and Biobehavioral Psychology], Elsevier (2017).
- [34] Blake, R. and Fox, R., "Binocular rivalry suppression: Insensitive to spatial frequency and orientation change," *Vision Res.* 14(8), 687–692 (1974).
- [35] Blake, R., Yu, K., Lokey, M. and Norman, H., "Binocular Rivalry and Motion Perception," *J Cogn Neurosci* 10(1), 46–60 (1998).
- [36] Blake, R., Westendorf, D. H. and Overton, R., "What is suppressed during binocular rivalry?," *Perception* 9(2), 223–231 (1980).
- [37] Haynes, J. D., Deichmann, R. and Rees, G., "Eye-specific effects of binocular rivalry in the human lateral geniculate nucleus," *Nature* 438(7067), 496–499 (2005).
- [38] O'Shea, R. P., Kormmeier, J. and Roeber, U., "Predicting Visual Consciousness Electrophysiologically from Intermittent Binocular Rivalry," *PLoS ONE* 8(10), e76134 (2013).
- [39] Cupero, F., Valimont, B., Wise, J., Best, C. and De Mers, B., "Head Worn Display System for Equivalent Visual Operations," NASA/CR-2009-215781, Nasa, Phoenix, AR (2009).
- [40] Coren, S. and Kaplan, C. P., "Patterns of ocular dominance," *Optom. Vis. Sci.* 50(4), 283–292 (1973).

- [41] Borrelli, A., Hon, G. and Zik, Y., [The Optics of Giambattista Della Porta (ca. 1535–1615): A Reassessment, Springer], Springer International Publishing (2017).
- [42] Bourassa, D. C., “Handedness and Eye-dominance: A Meta-analysis of Their Relationship,” *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition* 1(1), 5–34 (1996).
- [43] Porac, C. and Coren, S., “The dominant eye,” *Psychol. Bull.* 83(5), 880–897 (1976).
- [44] Porac, C., Whitford, F. W. and Coren, S., “The relationship between eye dominance and monocular acuity: an additional consideration,” *American journal of optometry and physiological optics* 53(12), 803–806 (1976).
- [45] Suttle, C., Alexander, J., Liu, M., Ng, S., Poon, J. and Tran, T., “Sensory ocular dominance based on resolution acuity, contrast sensitivity and alignment sensitivity,” *Clin. Exp. Optom.* 92(1), 2–8 (2009).
- [46] Ehrenstein, W., Arnold-Schulz-Gahmen, B. E. and Jaschinski, W., “Eye preference within the context of binocular functions,” *Graefes Arch. Clin. Exp. Ophthalmol.* 243(9), 926–932 (2005).
- [47] Gronwall, D. M. A. and Sampson, H., “Ocular dominance: a test of two hypotheses,” *Br. J. Psychol.* 62(2), 175–185 (1971).
- [48] Li, J., Lam, C. S. Y., Yu, M., Hess, R. F., Chan, L. Y. L., Maehara, G., Woo, G. C. and Thompson, B., “Quantifying sensory eye dominance in the normal visual system: a new technique and insights into variation across traditional tests,” *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* 51(12), 6875–6881 (2010).
- [49] Pointer, J. S., “Sighting versus sensory ocular dominance,” *J. Optom.* 5(2), 52–55 (2012).
- [50] Seijas, O., de Liaño, P. G., de Liaño, R. G., Roberts, C. J., Piedrahita, E. and Diaz, E., “Ocular dominance diagnosis and its influence in monovision,” *Am. J. Ophthalmol.* 144(2), 209–216 (2007).
- [51] Berner, G. E. and Berner, D. E., “Relation of ocular dominance, handedness, and the controlling eye in binocular vision,” *AMA Archives of Ophthalmology* 50(5), 603–608 (1953).
- [52] Lederer, J., “Ocular dominance,” *Clin. Exp. Optom.* 44(11), 531–574 (1961).
- [53] Cohen, J., “Eye-Dominance,” *Am. J. Psychol.* 65(4), 634 (1952).
- [54] Chaumillon, “Dominance oculaire : implications neurophysiologiques et conséquences au niveau de la visuomotricité” (2015).
- [55] Handa, T., Mukuno, K., Uozato, H., Niida, T., Shoji, N. and Shimizu, K., “Effects of dominant and nondominant eyes in binocular rivalry,” *Optom. Vis. Sci.* 81(5), 377–383 (2004).
- [56] Walker, P., “Binocular rivalry: Central or peripheral selective processes?,” *Psychol. Bull.* 85(2), 376–389 (1978).
- [57] Hollins, M. and Leung, E. H., “The influence of color on binocular rivalry,” [Visual psychophysics and physiology], Elsevier, 181–190 (1978).
- [58] Lee, S.-H. and Blake, R., “Rival ideas about binocular rivalry,” *Vision Res.* 39(8), 1447–1454 (1999).
- [59] O’Shea, R. P., Sims, A. J. H. and Govan, D. G., “The effect of spatial frequency and field size on the spread of exclusive visibility in binocular rivalry,” *Vision Res.* 37(2), 175–183 (1997).
- [60] Liu, L., Tyler, C. W. and Schor, C. M., “Failure of rivalry at low contrast: Evidence of a suprathreshold binocular summation process,” *Vision Res.* 32(8), 1471–1479 (1992).
- [61] Patterson, R., Winterbottom, M., Pierce, B. and Fox, R., “Binocular rivalry and head-worn displays,” *Hum. Factors* 49(6), 1083–1096 (2007).
- [62] Peli, E., “Visual issues in the use of a head-mounted monocular display,” *Opt. Eng.* 29(8), 883–893 (1990).
- [63] Winterbottom, M., Patterson, R., Pierce, B., Gaska, J. and Hadley, S., “Visibility of monocular symbology in transparent head-mounted display applications,” 2015, 94700Z.
- [64] Norman, H. F., Norman, J. F. and Bilotta, J., “The temporal course of suppression during binocular rivalry,” *Perception* 29(7), 831–841 (2000).
- [65] Denison, R. N., Piazza, E. A. and Silver, M. A., “Predictive context influences perceptual selection during binocular rivalry,” *Front. Hum. Neurosci.* 5(3), 1–11 (2011).
- [66] James, W., [The Principles of Psychology], H. Holt (1890).
- [67] Leopold, D. A. and Logothetis, N. K., “Multistable phenomena: changing views in perception,” *Trends Cogn. Sci.* 3(7), 254–264 (1999).
- [68] Tong, F., “Primary visual cortex and visual awareness: Cognitive neuroscience,” *Nat. Rev. Neurosci.* 4(3), 219–229 (2003).
- [69] Nobre, A. C., Sebestyen, G. N., Gitelman, D. R., Mesulam, M. M., Frackowiak, R. S. and Frith, C. D., “Functional localization of the system for visuospatial attention using positron emission tomography,” *Brain* 120 (Pt 3), 515–533 (1997).
- [70] Helmholtz, H. von and Southall, J. P. C., [Helmholtz’s treatise on physiological optics], Optical Society of America, Rochester, N.Y. (1924).

- [71] Hering, E., [Spatial sense and movements of the eye], American Academy of Optometry, Oxford, England (1942).
- [72] Andrews, T. J., Halpern, S. D. and Purves, D., "Correlated size variations in human visual cortex, lateral geniculate nucleus, and optic tract," *J. Neurosci.* 17(8), 2859–2868 (1997).
- [73] Song, C. and Yao, H., "Duality in binocular rivalry: distinct sensitivity of percept sequence and percept duration to imbalance between monocular stimuli," *PLoS One* 4(9), e6912 (2009).
- [74] Breese, B. B., "Binocular rivalry," *Psychological Review* 16(6), 410–415 (1909).
- [75] Meng, M. and Tong, F., "Can attention selectively bias bistable perception? Differences between binocular rivalry and ambiguous figures," *J Vis* 4(7), 2 (2004).
- [76] Ooi, T. L. and He, Z. J., "Binocular rivalry and visual awareness: the role of attention," *Perception* 28(5), 551–574 (1999).
- [77] Chong, S. C. and Blake, R., "Exogenous attention and endogenous attention influence initial dominance in binocular rivalry," *Vision Res.* 46(11), 1794–1803 (2006).
- [78] Paffen, C. and Van der Stigchel, S., "Shifting spatial attention makes you flip: Exogenous visual attention triggers perceptual alternations during binocular rivalry," *Atten Percept Psychophys* 72(5), 1237–1243 (2010).
- [79] Mitchell, J. F., Stoner, G. R. and Reynolds, J. H., "Object-based attention determines dominance in binocular rivalry," *Nature* 429(6990), 410–413 (2004).
- [80] Brascamp, J. W. and Blake, R., "Inattention Abolishes Binocular Rivalry: Perceptual Evidence," *Psychol. Sci.* 23(10), 1159–1167 (2012).
- [81] Zhang, P., Jamison, K., Engel, S., He, B. and He, S., "Binocular Rivalry Requires Visual Attention," *Neuron* 71(2), 362–369 (2011).
- [82] Bonnef, Y., Sagi, D. and Karni, A., "A transition between eye and object rivalry determined by stimulus coherence," *Vision Res.* 41(8), 981–989 (2001).
- [83] Tong, F., Meng, M. and Blake, R., "Neural bases of binocular rivalry," *Trends Cognit. Sci.* 10(11), 502–511 (2006).

Bayle E., Guilbaud E., Hourlier S., Lelandais S., Leroy L., Plantier J, Neveu P. « Which ocular dominance should be considered for monocular augmented reality devices? ». In : *20th International Symposium on Aviation Psychology, 379-384*, 2019. p. 6.

WHICH OCULAR DOMINANCE SHOULD BE CONSIDERED FOR MONOCULAR AUGMENTED REALITY DEVICES?

Elodie Bayle^{a,b,c}, Estelle Guilbaud^a, Sylvain Hourlier^b, Sylvie Lelandais^c, Laure Leroy^d, Justin Plantier^{a,c}, Pascaline Neveu^a

^a French Armed Forces Biomedical Research Institute, Brétigny-sur-Orge, France

^b Thales AVS France SAS, Mérignac, France

^c IBISC, Evry University, Paris Saclay University, Evry, France

^d Paris 8 University, Saint-Denis, France

A monocular augmented reality device allows the user to see information that is superimposed on the environment. As it does not stimulate both eyes in the same way, it creates a phenomenon known as binocular rivalry. The question therefore arises as to whether monocular information should be displayed to a particular eye and if an ocular dominance test can determine it. This paper contributes to give a better understanding of ocular dominance by comparing nine tests. Our results suggest that ocular dominance can be divided into sighting and sensorial dominance. However, different sensorial dominance tests give different results, suggesting that it is composed of distinct components that are assessed by different tests. There is a need for a comprehensive test that can consider all of these components, in order to identify on which eye monocular information should be directed to when using monocular augmented reality devices.

Augmented reality refers to an interactive virtual interface (in 2D or 3D) combined and superimposed in real time with the environment. Within the semi-transparent displays ('see-through' devices), displays can be divided into three types: binocular (two images are displayed, one to each eye), biocular (the same image is displayed to both eyes), or monocular (one image is displayed to one eye). Monocular devices are, in most cases, adjustable (*i.e.* information can be centered with respect to the observer's pupils), and also the lightest and least expensive system. However, as virtual information is only presented to one eye, the two eyes are not stimulated in the same way. This can lead to a phenomenon known as binocular rivalry, which can cause visual fatigue, headaches, visual suppression, etc. (Hershberger & Guerin, 1975). Monocular augmented reality devices therefore raise the question of which eye should receive monocular information.

Currently, there is no consensus in the literature. On the one hand, Hershberger and Guerin (1975) argue that there are fewer disturbing phenomena when information is fed to the dominant eye. On the other hand, and more recently, Cupero et al. (2009) demonstrated that the eye that information is displayed to has no influence on perception. In these two studies, dominant eye was considered as the sighting eye. However, there is little agreement among the scientific community regarding the definition of ocular dominance. The many definitions go hand-in-hand with the multitude of ways to determine it, which together contribute to a lack of clarity on its determination and its use. As binocular rivalry is a sensorial phenomenon (Coren & Kaplan, 1973; Handa et al., 2004; Li et al., 2010; Seijas et al., 2007), the question arises of whether the sighting eye is relevant to be considered in the case of monocular augmented reality and if all dominant eye tests give consistent results. Only Gronwall and Sampson (1971) have

found a positive correlation between various dominance tests, suggesting a unifactorial phenomenon. Other authors identified two (*i.e.* sighting and sensory dominance) (Cohen, 1952) to five groups (*i.e.* monocular acuity, sighting dominance, orientation dominance, sensory dominance and hemi-retina dominance) (Lederer, 1961).

As with any lateralization of the human body, ocular dominance can be expressed in terms of strength of dominance. Chaumillon (2017) found that patients with less pronounced ocular dominance are thought to have fewer visual constraints leading to better support for monovision. This finding, in turn, raises the question of the impact of the strength of ocular dominance on the use of monocular augmented reality devices.

The aim of the present study is to identify whether different dominant eye tests give consistent results in terms of preferred eye and strength of dominance.

Methods

Participants

A total of nineteen participants, ten men and nine women with normal or corrected-to-normal vision (18–60 years; mean 36.9 ± 12.1) were enrolled in the experiment. Three participants were excluded from the analysis because their acuity was worse than 0.05 log or their blink rate meant that fixation could not be maintained during the form rivalry test. All participants gave written informed consent. The study was conducted in accordance with the Helsinki Declaration and met local legal requirements (N IDRCB: 2018-A01331-54).

Tests

We compared nine ocular dominance assessment methods conducted in the same order for each participant: far and near acuity, Near Point Convergence test (NPC), first repetition of the form rivalry test, Bagolini test, Worth test, +1.5 δ blur test, hole-in-card test, second repetition of form rivalry test, motion coherence threshold test repeated three times and last repetition of form rivalry test (Table 1.).

Following Blake and Logothetis (2002), form rivalry and motion threshold test were displayed using a mirror stereoscope, for details see Neveu et al. (2012). At 0.5 meter, participants perceived a minimum horizontal visual field of 18.30° , and 21.17° vertically through the device. They could indicate what they saw with a computer keyboard and their position was stabilized via a chin rest, forehead support (Handa et al., 2004) and mouthpiece similar to dental X-ray equipment. Stimuli were generated using the MATLAB Psychophysics Toolbox (The MathWorks, Natick, MA, USA).

Form rivalry test was based on Coren and Kaplan (1973) and Handa et al. (2004). Two sinusoidal patterns were presented using the stereoscope: one oriented at 0° for the right eye; and at 90° for the left eye. A spatial frequency of 3.87 cpd was selected to approach the highest spatial frequency used in the form rivalry literature. Contrast was set at 100%. Maximum and minimum target luminance were set at 120 and 0.8cd/m^2 , respectively, and mean luminance of the target and background was 42cd/m^2 . The stimulation was presented for ten seconds, during which participants were asked to avoid blinking (blinking acts as a reset of the visual system (Rainwater & Cogan, 1975), and the frequency could have modified the results). They pressed the 'space' key on the keyboard when they only saw horizontal striations, and the 'enter' key

when they only saw vertical striations. If their perception was mixed, they did not press any key. The task was repeated four times with a three-second break to allow the participant to blink.

Table 1.
Different tests used.

Test	Dominant eye	Reference
1. Hole-in-card	Eye behind the hole when focusing a Landol rings scale at 5m, 551 lux.	(Li et al., 2010)
2. NPC	First eye to diverge.	(Li et al., 2010)
3. Far acuity	Eye having the best acuity on Landol rings scale.	
4. Near acuity	Eye having the best acuity on Logarithmic morphoscopic scale at 0.5m, 551 lux.	
5. Bagolini	Eye needed the highest filter to suppress (by 0.3 to 1.8 log units) at 0.5m, 20 lux.	(Li et al., 2010)
6. Near Worth	Eye having the colored filter of the color of the bottom point of the test at 0.33m, 20 lux.	(Li et al., 2010)
7. +1.5δ blur	Eye having the highest blur induced by +1.5δ when focusing the Landol rings scale.	(Pointer, 2012)
8. Form rivalry	Eye having the target seen the longest time.	(Coren & Kaplan, 1973) (Handa et al., 2004)
9. Motion threshold	Eye having the lowest threshold of points needed to evaluate movement.	(Li et al., 2010)

Data analysis

The results for each test were coded as -1 if the left eye (LE) was dominant, $+1$ if the right eye (RE) was dominant or 0 if the test did not detect a dominant eye. To be in accordance with the qualitative analysis of the results, strength of dominance for acuity tests, Bagolini and $+1.5\delta$ were evaluated using the formula (Li et al., 2010): $(RE\ results - LE\ result)/(RE\ result + LE\ result)$ whereas it was determined by: $(LE\ threshold - RE\ threshold)/(LE\ threshold + RE\ threshold)$ for motion coherence test. Strength of dominance for form rivalry was obtained by: $(percentage\ RE - percentage\ LE)/100$. Z scores were calculated qualitative and quantitative data to compare the tests together. Qualitative and quantitative data were analyzed using a Kendall 2×2 rank correlation (Coren & Kaplan, 1973; Li et al., 2010). Next, following Coren and Kaplan (1973), a factor analysis was run to determine if the results could be grouped. All statistical analyses used the STATISTICA® (StatSoft, Tulsa, OK, USA) statistics package, and a p value ≤ 0.05 was considered significant.

Results

Results across the tests are very different (Table 2). To compare qualitative results correlation coefficients were calculated on Z scores. The best correlation was found between the hole-in-card test and the motion threshold test ($\tau=0.683$). The hole-in-card test was also highly correlated with the near vision acuity test ($\tau=0.583$) and the NPC ($\tau=0.510$). To explore the findings in more detail, we carried out a factorial analysis (Table 2). The first factor grouped four

tests which can be considered as assessing sighting or motor dominance. Strength of dominance was only analyzed on the other tests (*i.e.* Bagolini, +1.5 δ blur, and form rivalry tests), as the sensorial dominance can be the relevant dominance to considered in the case of monocular augmented reality.

Figure 1 shows the participant distribution of the quantitative data in absolute values – values closer to one indicate greater dominance. This figure highlights that ocular dominance was, in general, weak and that the distribution of strength dominance according each test varies. No correlation between quantitative sensory tests was found.

Table 2.

Percentages of Participants (n=16) Classified with Right, Left, or Uncertain and Factor Loadings on Tests for Ocular Dominance on the three Extracted Factors.

Test	Right	Left	Uncertain	Factor I	Factor II	Factor III
1. Hole-in-card	62.5	37.5	-	0.906*	0.047	0.044
2. NPC	31.3	18.8	50	0.674*	0.205	0.212
3. Far acuity	18.8	50	31.3	0.305	-0.745*	0.003
4. Near acuity	31.3	25	43.8	0.708*	0.018	-0.511
5. Bagolini	43.8	25	31.3	0.006	-0.730*	0.074
6. Near Worth	12.5	31.3	56.3	0.021	-0.365	-0.849*
7. +1.5 δ blur	50	43.8	6.3	-0.265	-0.799*	0.212
8. Form rivalry	35.7	64.3	-	-0.396	-0.254	0.006
9. Motion threshold	43.8	56.3	-	0.755*	-0.354	0.337
10. Handedness	75	25	-			

Note. *Values above 0.6 are high enough to be considered statistically reliable.

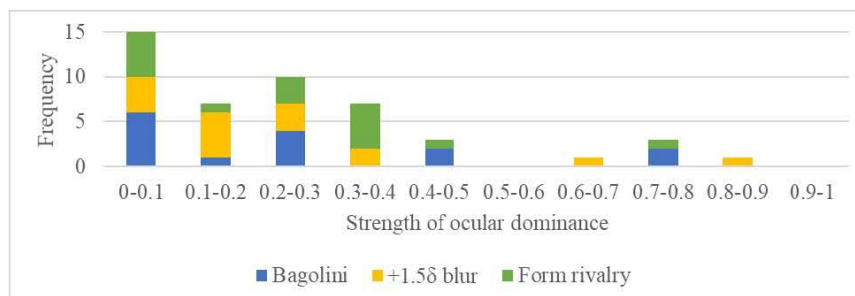


Figure 1.

Distribution of the Population as a Function of Strength of Ocular Dominance.

Discussion

The aim of the present study is to identify whether different dominant eye tests give consistent results in term of preferred eye and strength of dominance. More globally, the goal was to determine whether a particular test is effective in the context of using a monocular augmented reality device.

The analysis of the distribution of ocular dominance shows that it differs according to the test. The results of the hole-in-card test are consistent with Gronwall and Sampson (1971) study.

Like Seijas et al. (2007), we found that the Worth test is unable to classify dominance in a high proportion of subjects, and that the blur test has the lower uncertainty in clinical tests.

Factor analysis distinguished several groups of tests. The first consists of the hole-in-card test, the NPC test, the near vision acuity test, and the motion threshold test. This group of tests mainly takes into account tests identified in the literature as characterizing sighting or motor dominance (*i.e.* hole-in-card and NPC). Correlations between the tests are consistent with this grouping and are consistent with the literature (Coren & Kaplan, 1973; Gronwall & Sampson, 1971; Li et al., 2010, 2010; Pointer, 2012; Seijas et al., 2007). Thereby, the near vision acuity dominance would be more related to the participant's ability to converge than to discriminate details (Pointer, 2012) and it is possible that, despite the central fixation point during the moving threshold test, the moving points generate involuntary ocular eye movement.

The second factor grouped the far vision acuity test, the Bagolini test, and the +1.5 δ blur test. However, there were no significant correlations between them. These results suggest that even they may share some common features, they do not give the same results, and they cannot be used interchangeably.

The factorial analysis identified a third factor, mainly based on the near Worth test. The fact that this test is responsible for a factor and does not correlate with other tests suggests that color plays a singular role in sensorial dominance. Our result is consistent with Seijas et al. (2007), who also found that the Worth test was uncorrelated with any other test.

Our results suggest that different sensorial dominance tests give different results. This was confirmed by the analysis of the strength of dominance. Paired correlations highlighted that tests are uncorrelated, as several authors have already noted (Cohen, 1952; Coren & Kaplan, 1973; Li et al., 2010). Our results suggest that sensorial ocular dominance is not unifactorial, but is made up of distinct components. Specifically, each test appears to assess one component of the sensorial ocular dominance. Thereby, Worth test shows which eye is preferred when color challenges binocular vision; the Bagolini test assesses the preferred eye when luminance challenges binocular vision; and the +1.5 δ test assesses the preferred eye when blur challenges binocular vision.

Our results suggest that ocular dominance tests fall into two distinct groups: motor and sensory dominance. It suggests that the eye considered by previous studies (Cupero et al., 2009; Hershberger & Guerin, 1975) to explore if information must be displayed in a particular eye when using a monocular augmented reality device is not relevant to be considered. While motor tests have similarities, the results of different sensory tests appear to be inconsistent. This latter observation highlights the importance of considering the set of sensory ocular dominance factors to determine the eye on which monocular information should be directed to when using monocular augmented reality devices. As far as we are aware, no test exists to reliably, and whatever the stimulus, determine the sensorial dominance.

References

- Blake, R., & Logothetis, N. K. (2002). Visual competition. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(1), 13–21. <https://doi.org/10.1038/nrn701>
- Chaumillon, R., Alahyane, N., Senot, P., Vergne, J., Lemoine-Lardennois, C., Blouin, J., ... Vergilino-Perez, D. (2017). Asymmetry in visual information processing depends on the strength of eye dominance. *Neuropsychologia*, 96, 129–136.

- Cohen, J. (1952). Eye-Dominance. *The American Journal of Psychology*, 65(4), 634. <https://doi.org/10.2307/1418050>
- Coren, S., & Kaplan, C. P. (1973). Patterns of ocular dominance. *Optometry & Vision Science*, 50(4), 283–292.
- Cupero, F., Valimont, B., Wise, J., Best, C., & De Mers, B. (2009). *Head Worn Display System for Equivalent Visual Operations* (No. NASA/CR-2009-215781). Phoenix, AR: Nasa.
- Gronwall, D. M. A., & Sampson, H. (1971). Ocular dominance: a test of two hypotheses. *British Journal of Psychology*, 62(2), 175–185. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1971.tb02028.x>
- Handa, T., Mukuno, K., Uozato, H., Niida, T., Shoji, N., & Shimizu, K. (2004). Effects of dominant and nondominant eyes in binocular rivalry. *Optometry & Vision Science*, 81(5), 377–383. <https://doi.org/10.1097/01.opx.0000135085.54136.65>
- Hershberger, M. L., & Guerin, D. F. (1975). *Binocular rivalry in helmet-mounted display applications* (No. AD-AO13 838) (pp. 1–146). Culver City, CA: Aerospace Medical Research Laboratory.
- Lederer, J. (1961). Ocular dominance. *Clinical and Experimental Optometry*, 44(11), 531–574. <https://doi.org/10.1111/j.1444-0938.1961.tb06505.x>
- Li, J., Lam, C. S. Y., Yu, M., Hess, R. F., Chan, L. Y. L., Maehara, G., ... Thompson, B. (2010). Quantifying sensory eye dominance in the normal visual system: a new technique and insights into variation across traditional tests. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 51(12), 6875–6881. <https://doi.org/10.1167/iovs.10-5549>
- Neveu, P., Philippe, M., Priot, A.-E., Fuchs, P., & Roumes, C. (2012). Vergence tracking: a tool to assess oculomotor performance in stereoscopic displays. *Journal of Eye Movement Research*, 9. <https://doi.org/10.16910/jemr.5.2.1>
- Pointer, J. S. (2012). Sighting versus sensory ocular dominance. *Journal of Optometry*, 5(2), 52–55. <https://doi.org/10.1016/j.optom.2012.03.001>
- Rainwater, G., & Cogan, R. (1975). Simultaneous disappearances of both images during binocular rivalry of contours and effect on eye-blink rate. *Perceptual and Motor Skills*, 40(1), 71–77. <https://doi.org/10.2466/pms.1975.40.1.71>
- Seijas, O., de Liaño, P. G., de Liaño, R. G., Roberts, C. J., Piedrahita, E., & Diaz, E. (2007). Ocular dominance diagnosis and its influence in monovision. *American Journal of Ophthalmology*, 144(2), 209–216. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2007.03.053>

View publication stats

Titre : Entre fusion et rivalité binoculaires : Impact des caractéristiques des stimuli visuels lors de l'utilisation d'un système de réalité augmentée semi-transparent monoculaire

Mots clés : réalité augmentée monoculaire, rivalité binoculaire, fusion binoculaire, dominance oculaire

Résumé : Les visuels de casque monoculaires utilisés dans l'aéronautique augmentent la vision des pilotes et facilitent l'accès aux informations essentielles telles que la symbologie de vol. Ils sont plus légers et plus ajustables que leurs homologues binoculaires, peuvent s'intégrer dans n'importe quel aéronef et permettent de conserver l'information quelle que soit la direction de regard. Cependant, ils génèrent une perception particulière puisqu'une image virtuelle monoculaire se superpose à l'environnement réel binoculaire. Des informations différentes sont projetées à des régions correspondantes des deux yeux créant un conflit interoculaire. L'enjeu de cette thèse est d'évaluer l'impact des caractéristiques des stimuli sur les performances aux tâches réalisées via ce type de système afin d'en optimiser l'utilisation.

Deux études psychophysiques et une étude écologique en simulateur de vol ont été réalisées. Toutes ont montré un bon confort à l'exposition. Les performances ont été évaluées en fonction des caractéristiques du fond binoculaire, de l'affichage de l'image monoculaire et des caractéristiques d'évènements à détecter. Le choix de l'œil de présentation n'est pas anodin étant donné les différences entre les performances réalisées avec le monoculaire sur chacun des deux yeux. Nos résultats aux trois études montrent également que, comme pour deux images fusionnables ou dichoptiques, les performances sont dépendantes des stimulations visuelles. Ils suggèrent donc qu'il faille envisager une symbologie adaptative qui ne peut se résumer au changement de luminosité dont dispose actuellement les pilotes.

Title : Between binocular fusion and binocular rivalry: Impact of visual stimuli characteristics when using a monocular augmented reality device

Keywords : monocular augmented reality, binocular rivalry, binocular fusion, ocular dominance

Abstract : Monocular augmented reality devices are used in the aeronautical field to enhance pilots' vision by providing access to essential information such as flight symbology. They are lighter and more adjustable than their binocular counterparts, can be integrated into any aircraft, and allow information to be retained regardless of gaze direction. However, they generate a particular perception since a monocular virtual image is superimposed on the real binocular environment. Different information is projected to corresponding regions of the two eyes creating an interocular conflict. The goal of this thesis is to evaluate the impact of the stimuli characteristics on the performance of tasks performed with this type of system to optimize its use. Two psychophysical studies and an ecological study in a flight simulator

have been carried out. All of them showed a good comfort when exposed to interocular conflict. The performances were evaluated according to the characteristics of the binocular background, the display of the monocular image and the characteristics of events to be detected. The choice of the presenting eye is not insignificant given the differences between the performances achieved with the monocular on each of the two eyes. Our results from the three studies also show that, as with two fusible or two dichoptic images, performance is dependent on visual stimuli. They therefore suggest that an adaptive symbology should be considered, which cannot be summarized by the change in brightness currently available to pilots.