



**HAL**  
open science

# Etude de l'influence des disparités horizontales et verticales sur la perception de la profondeur en champ visuel périphérique

Céline Devisme

► **To cite this version:**

Céline Devisme. Etude de l'influence des disparités horizontales et verticales sur la perception de la profondeur en champ visuel périphérique. Physiologie [q-bio.TO]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2008. Français. NNT : . tel-00276430

**HAL Id: tel-00276430**

**<https://theses.hal.science/tel-00276430>**

Submitted on 29 Apr 2008

**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.

**THESE DE DOCTORAT DE  
L'UNIVERSITE PARIS VI - PIERRE ET MARIE CURIE**

Spécialité  
**SCIENCES COGNITIVES**

Présentée par

**Céline DEVISME**

En vue de l'obtention du grade de  
**DOCTEUR de L'UNIVERSITE DE PARIS VI**

Sujet de la thèse :

**Etude de l'influence des disparités horizontales  
et verticales sur la perception de la profondeur  
en champ visuel périphérique**

Soutenue le 22 février 2008

DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

DR.	Jacques	DROULEZ	<i>DIRECTEUR DE THESE</i>
PR.	Michel	IMBERT	<i>PRESIDENT DU JURY</i>
PR.	Corinne	ROUMES	<i>RAPPORTEURS</i>
DR.	Pascal	MAMASSIAN	
DR.	Björn	DROBE	<i>EXAMINATEURS</i>
DR.	Yves	TROTTER	



## Résumé

La disparité binoculaire est l'indice le plus pertinent dans la perception de la profondeur jusqu'à 2m. L'apposition de verres ophtalmiques devant les yeux engendre une modification de la distribution des disparités binoculaires existant naturellement dans les scènes visuelles. Ces modifications des disparités horizontales et verticales peuvent avoir des répercussions sur la perception du relief et de la profondeur, notamment en vision périphérique.

L'analyse de la distribution des disparités horizontales et verticales induites par des verres ophtalmiques unifocaux met en évidence des variations concentriques pour les disparités horizontales. Les disparités verticales relatives sont généralement de même signe que les disparités horizontales, sauf dans les cas où les disparités horizontales sont importantes.

Une première étude a montré l'importance du gradient de disparité horizontale dans la détection de déformation en profondeur, en champ visuel périphérique. Ce gradient de disparité, au seuil de détection, dépend de son excentricité d'origine. De plus, la sensibilité pour les disparités homonymes semble plus fine que pour les disparités croisées.

Les disparités horizontales, selon un même pattern concentrique, sont combinées avec des disparités verticales, calculées à partir des formes tridimensionnelles obtenues par la disparité horizontale (forme concave/convexe selon le signe, croisé/homonyme, des disparités horizontales périphériques), de façon congruentes ou en conflit (en terme de signe), ou bien dans des plans de profondeur différente. Les résultats montrent que les disparités verticales peuvent modifier la sensibilité aux gradients de disparité horizontale. Ces modifications vont dépendre des signes des disparités horizontales et verticales par rapport au plan de fixation. Dans la perception de la profondeur sur l'ensemble du champ visuel, les disparités horizontales permettent donc de percevoir la forme tridimensionnelle et les disparités verticales viennent définir la distance en profondeur de cette forme par rapport au plan de fixation.

Enfin, les disparités binoculaires induites par des verres ophtalmiques unifocaux sont étudiées au regard des résultats expérimentaux. Les disparités horizontales, en termes de gradient en fonction de l'excentricité, sont inférieures aux seuils obtenus expérimentalement pour les corrections les plus courantes, et deviennent supérieures pour des cas spécifiques (une différence de correction entre les deux yeux par exemple). Les disparités verticales sont congruentes dans la plupart des cas courant et en conflit quand les disparités horizontales sont importantes, permettant dans ces cas de compenser une partie des disparités horizontales. Le port de verres ophtalmiques peut modifier sensiblement la perception de la profondeur et du relief, en particulier pour des corrections importantes.

Les disparités horizontales et verticales ont donc chacune un rôle bien précis dans la perception de la profondeur sur l'ensemble du champ visuel : les disparités horizontales sont traitées localement dans le champ visuel, de façon dérivative entre les points voisins, définissant ainsi une forme tridimensionnelle ; les disparités verticales sont traitées de façon globale, elles indiquent au système visuel la distance en profondeur par rapport au plan de fixation.

---

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'une thèse CIFRE (contrat ANRT n°761/2004) entre Essilor International, R&D Optique, au sein du Service Vision, et le Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action (LPPA), UMR7152 CNRS - Collège de France.

## **Abstract**

Binocular disparity is the most relevant depth cue within 2m. The wearing of ophthalmic lenses creates a change of the binocular disparity pattern naturally present in the visual scene. These changes in binocular disparity can modify depth perception, especially in peripheral vision.

The analysis of the horizontal and vertical disparity pattern induced by ophthalmic single vision lenses highlights concentric variations of horizontal disparities. The vertical disparities usually have the same depth sign as the horizontal disparities, except when horizontal disparities are large.

A first study showed that detection of depth deformation in peripheral visual field depended on horizontal disparity gradient and on the eccentricity at the beginning of disparity variation. Moreover, the visual system seems to be more sensitive to uncrossed disparities than crossed disparities.

The combination of horizontal disparities, with the concentric pattern, and vertical disparities, computed from 3D shapes of horizontal disparities (concave or convex shape as a function of respectively crossed or uncrossed peripheral horizontal disparity), can be congruent or in conflict (relative to the depth sign), or in different depth planes. Results showed that vertical disparity can modify the sensitivity to horizontal disparity gradient. These changes depended on depth signs of horizontal and vertical disparities relative to the fixation plane. In depth perception all over the visual field, horizontal disparity yields the perception of 3D shape, and vertical disparity gives an estimation of the absolute distance of the horizontal disparity 3D shape relative to the fixation plane.

Finally, the binocular disparities induced by single vision lenses were studied as a function of experimental results. For current ametropia prescription, horizontal disparities, in the ratio gradient/eccentricity, are lower than experimental thresholds. They become higher than thresholds for specific compensation like anisometropia prescription. The vertical disparities are congruent in the current cases and in conflict when the horizontal disparities are large, so as to compensate a part of them. The ophthalmic lenses wearing can sensibly modify depth perception, especially for the large prescriptions.

The horizontal and vertical disparities would have a specific role in depth perception all over the visual field: horizontal disparity is processed locally in the visual field, with derivative function between neighbouring points, to give the 3D shape; vertical disparity is globally processed to estimate the absolute distance relative to the fixation plane.

---

This work was supported by the company Essilor International and the ANRT association (Convention CIFRE No.761/2004). This work was performed in the Vision Science department, R&D Optics, Essilor International, and the « Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action » (LPPA), CNRS - Collège de France, UMR7152.

## Remerciements

Ce manuscrit rassemble l'ensemble du travail scientifique de trois années de thèse. Mais une thèse ne se résume pas simplement aux résultats scientifiques, ce sont également des rencontres, une expérience humaine et donc un enrichissement personnel de trois ans d'une vie, ponctués de bons moments et d'obstacles à surmonter. Ces trois années bien remplies, qui sont une part de vie et que je n'oublierai pas, je les dois à tous les échanges scientifiques, à toutes les personnes qui m'ont encouragée et soutenue, et enfin à toutes les personnes que j'ai croisées pendant cette « parenthèse » de ma vie. Cette page de remerciement leur est destinée, et j'espère oublier personne.

Tous les acteurs de cette pièce, à qui je souhaite exprimer ma reconnaissance, sont :

*Dans les rôles d'initiateur du projet :*

**Annie Monot**, pour m'avoir acceptée en DEA, avoir été mon maître pour l'optique physiologique et être restée à mes côtés jusqu'à la fin. Je vous remercie de votre soutien scientifique et humain. C'est aussi vous qui m'avez permis de faire mes premiers pas dans l'enseignement en me transmettant vos cours d'optique physiologique à l'Université d'Orsay, cette expérience a beaucoup compté pour moi.

**Björn Drobe**, pour avoir cru en moi et m'avoir lancée dans cette aventure, en me permettant de faire ce travail dans les meilleures conditions possibles, pour m'avoir d'abord guidée pas à pas puis laissée voler de mes propres ailes. Merci de m'avoir prêté tes yeux pour mes essais. Merci pour ta rigueur allemande qui permet de ne pas s'égarer... Merci tonton Björny !

*Dans le rôle de directeur de thèse :*

**Jacques Droulez**, pour sa présence discrète mais efficace tout au long de la thèse, pour sa disponibilité, sa réactivité et ses compétences. Je te remercie pour toujours avoir valorisé mon travail et m'avoir donné plus confiance en moi.

*Dans les rôles de membres du jury de thèse :*

Madame **Corinne Roumes**, Messieurs **Michel Imbert**, **Pascal Mamassian** et **Yves Trotter** qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer mon travail. Merci à **Corinne Roumes** et **Pascal Mamassian** d'avoir accepté le rôle de rapporteur.

*Dans les rôles de responsable de laboratoire ou chef de service, de pôle :*

Monsieur le professeur **Alain Berthoz**, pour m'avoir accueilli au sein du Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action et pour m'avoir évité la recherche océanographique sur la perception des profondeurs...

**Bruno Decreton**, pour m'avoir accueilli dans le service Vision au sein des R&D Optique (merci aussi à **Gilles Le Saux**) d'Essilor International. Merci Bruno de m'avoir intégré dans ton service non pas comme une stagiaire mais avec autant d'égard que mes collègues.

**Claude Pédrone**, qui est finalement à l'origine du lien avec Essilor, ayant été mon maître de stage de maîtrise il y a quelques années. Je te suis reconnaissante pour m'avoir permis de faire pleinement partie de ton pôle et pour ta conviction de la nécessité d'étudier les disparités binoculaires.

*Dans les rôles d'observateur volontaire :*

**Natalia, Marie-Anne, Clotilde, Sarah, Hélène, Björn, Emmanuel, Benjamin, Claude, Guillaume, Thierry, Johan...** pour accepter de participer à mes expériences avec les contraintes de temps et de répétitivité que ça impliquait. Merci à vous tous pour votre patience, votre disponibilité et votre investissement, sans vos yeux cette thèse n'aurait aucune consistance ! Vous êtes les acteurs principaux de cette pièce...

*Dans les rôles d'assistant technique :*

**Guillaume Giraudet** pour ces précieux conseils, son esprit critique et sa rigueur scientifique.

**Gildas Marin**, pour son aide en programmation et son support technique pour la simulation virtuelle, qui n'a jamais refusé de m'aider sans contrepartie, qui a gentiment accepté de partager son espace de travail (le « simu ») avec les conséquences dévastatrices que ça a impliqué. Je tiens à souligner ton « esprit d'équipe » !

Plusieurs personnes « de l'ombre » ont contribué de façon non négligeable à la réalisation de ce travail : **Agnès Ladous**, pour sa contribution dans la partie appliquée aux verres progressifs, par la réalisation du programme de base nécessaire pour le calcul des disparités des verres ; **Carolyn Wiggins** pour sa précieuse aide en anglais ; **Thierry Bonnin** pour la réalisation du système de contrôle de la fixation par électro-oculographie ; **Gérald Corbin**, pour son assistance dans l'impression des différents posters présentés lors des conférences ; enfin **Martine Mallet** pour avoir accepté de relire ce travail afin de corriger la forme, sans se soucier du fond.

*Dans les rôles de collègues :*

**Marie-Anne**, que je ne saurais jamais assez remercier pour son dévouement expérimental, pour sa bonne humeur quotidienne, pour son soutien moral permanent et pour sa sympathie. J'ai eu la chance de partager son bureau pendant trois ans, soit environ 480 jours... une véritable amie à présent. Un grand merci à toi.

Tous mes collègues du service Vision, qui ont agrémenté mes pauses et m'ont supportée, sans oublier celles qui ont quitté le service, mais ont continué à m'entourer quelle que soit la distance qui nous a séparées : **Natalia, Diane et Céline**.

Les personnes présentes au Muséum National d'Histoire Naturelle pendant le premier acte de la thèse, qui ont guidé mes premiers pas dans la recherche et qui ont toujours été mes références : **Margalith, Françoise, Ouided, Thibaut, Gaël..**

Les personnes que j'ai croisées au Collège de France pendant le second acte de la thèse : **Camille, Audrey, Sandrine, France, Simon, Mark, Francis, Christian, Jean, et tous les autres...**

*Dans les rôles de proches, amis et famille :*

**Ma famille, mes oncles et tantes, mes grands-parents, mes cousins, ma « belle-famille »** et mon grand frère **Olivier** malgré les sept heures d'avion qui nous séparaient. Sans oublier, bien sûr, **ma maman**, qui m'a toujours fait confiance et soutenue dans mes choix. Tout au long de mes études, elle m'a encouragé et remonté le moral dans les moments difficiles, elle m'a permis de réaliser mes projets et a toujours cru en moi... merci, merci, merci !

Mes amis, ceux qui étaient présents physiquement et tout particulièrement **Elsa**, ma fidèle amie qui est restée à mes côtés depuis mes débuts dans le monde de la vision et qui a toujours su enrichir ma culture artistique, sans oublier ses trois petits rayons de soleil (**Flore, Amaury et Johan**). Tous mes autres amis, physiquement plus loin, qui m'ont soutenu psychologiquement et à qui je garde une petite place dans mon cœur. Mes pensées vont également à **Véronique** et **Arnaud**, avec leur petit **Nathan** qui ont été très présents malgré la distance et qui m'ont permis de suivre une photothérapie quelques week-ends chaque année. Merci à tous de m'avoir « sortie » de la thèse, de m'avoir permis de profiter de la vie à côté de ce travail prenant.

**Bertrand** pour m'avoir supporté au quotidien, dans les moments difficiles, pour m'avoir soutenu pendant trois années et pour m'avoir permis de garder les pieds sur terre...

*Dans tous les autres rôles, les personnes que j'ai oubliés de citer et qui m'ont apporté la moindre petite aide.*

**A mon père et mon petit frère Julien,  
une partie de moi-même...**



## Table des matières

<b>Résumé .....</b>	<b>1</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>3</b>
<b>Remerciements.....</b>	<b>5</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>15</b>
<b>Chapitre 1. Perception stéréoscopique et disparités binoculaires.....</b>	<b>17</b>
<b>I Généralités sur la perception du relief et de la profondeur.....</b>	<b>17</b>
I.1 Anatomie du système visuel .....	17
I.2 Les indices de perception du relief et de la profondeur .....	20
I.2.1 Les indices monoculaires.....	22
I.2.2 Les indices binoculaires.....	24
I.2.3 Les limites physiologiques de la fusion binoculaire .....	25
I.3 L'indice de disparité binoculaire .....	28
I.3.1 Définition .....	28
I.3.2 Les différents repères.....	30
I.3.3 L'horoptère .....	31
I.3.4 La disparité horizontale.....	33
I.3.5 La disparité verticale.....	36
<b>II Le traitement des disparités : la stéréopsie.....</b>	<b>39</b>
II.1 Caractérisation de la vision stéréoscopique.....	39
II.1.1 L'acuité stéréoscopique.....	39
II.1.2 Les stéréogrammes cyclopéens.....	40
II.1.3 Le phénomène d'hystérésis stéréoscopique.....	41
II.1.4 La stéréopsie globale / locale.....	42
II.1.5 La stéréopsie en vision périphérique.....	43
II.2 Relation entre la perception des formes et la distribution des disparités binoculaires .....	44
II.2.1 Le plan fronto-parallèle.....	44
II.2.2 L'inclinaison et l'obliquité d'une surface .....	45
II.2.3 Les courbures .....	47
II.2.4 La contrainte épipolaire .....	47
II.2.5 Le contraste de profondeur.....	48
II.3 Perception de la profondeur et disparités .....	49
II.3.1 Le plan de référence .....	49
II.4 L'interaction entre les disparités horizontales et verticales.....	50
II.4.1 L'interaction entre la disparité et la convergence .....	51

II.5 Le traitement de la disparité binoculaire .....	52
II.5.1 Les interactions locales .....	53
II.5.2 Les effets consécutifs ou post-effets de relief.....	53
II.5.3 L'apprentissage perceptif.....	54
II.6 Les mécanismes neuronaux impliqués dans le traitement des disparités .....	55
<b>III Objectifs de l'étude.....</b>	<b>58</b>
<b>Chapitre 2. Les verres optiques unifocaux.....</b>	<b>61</b>
<b>I Présentation générale de l'optique ophtalmique .....</b>	<b>61</b>
I.1 Les propriétés optiques du verre .....	61
I.2 La correction des amétropies et la presbytie.....	64
<b>II Méthodologie pour le calcul des disparités des verres optiques.....</b>	<b>66</b>
<b>III Description des disparités des verres unifocaux .....</b>	<b>68</b>
<b>IV Les disparités binoculaires des verres unifocaux.....</b>	<b>84</b>
<b>Chapitre 3. Méthodologie générale.....</b>	<b>87</b>
<b>I Description du matériel.....</b>	<b>87</b>
I.1 Le simulateur .....	87
I.2 Le contrôle de la fixation par électro-oculographie .....	88
I.3 Description des images .....	90
I.3.1 La cible de fixation.....	90
I.3.2 L'image de préfixation.....	90
I.3.3 Les disparités appliquées au stimulus.....	90
I.3.4 Les conditions expérimentales .....	91
<b>II Choix du stimulus.....</b>	<b>92</b>
II.1 Présentation des stimuli étudiés.....	92
II.2 Comparaison des deux stimuli.....	94
<b>III Méthode de mesure des seuils de discrimination de relief.....</b>	<b>96</b>
III.1 Méthode psychophysique .....	96
III.2 Déroulement du test .....	96
<b>IV Les observateurs .....</b>	<b>97</b>
<b>Chapitre 4. Le traitement des disparités horizontales sur l'ensemble du champ visuel.....</b>	<b>99</b>
<b>I L'étude de la disparité horizontale en fonction de l'excentricité .....</b>	<b>99</b>
I.1 Introduction.....	99
I.2 Aspects méthodologiques .....	100
I.3 Résultats et discussion .....	101
<b>II Le post-effet de relief .....</b>	<b>119</b>

II.1	Présentation et mise en évidence de l'effet .....	119
II.2	Etude de l'influence du post-effet sur les seuils de détection d'une déformation du plan fronto-parallèle .....	120
II.2.1	Traitement des données .....	120
II.2.2	Résultats de l'étude de l'influence du signe du post-effet .....	121
II.2.3	Discussion générale sur l'effet consécutif du relief pour des déformations concave ou convexe de surface .....	131
II.2.4	Interprétation des résultats.....	133
<b>III</b>	<b>Comparaison des seuils obtenus selon la méthode .....</b>	<b>135</b>
III.1	Introduction .....	135
III.2	Matériel et méthode.....	135
III.2.1	Le masque.....	136
III.2.2	Les observateurs.....	136
III.2.3	Le protocole expérimental.....	136
III.2.4	Le déroulement du test .....	137
III.3	Résultats et analyse .....	138
III.3.1	Résultats de la méthode de stimuli constant.....	138
III.3.2	Comparaison avec une méthode de stimuli constants ascendants.....	142
III.4	Discussion des résultats.....	143
<b>IV</b>	<b>Influence de la vitesse d'affichage avec une méthode d'ajustement .....</b>	<b>146</b>
IV.1	Protocole expérimental .....	146
IV.2	Résultats et discussion sur la vitesse d'affichage.....	147
<b>V</b>	<b>L'application aux verres ophtalmiques .....</b>	<b>150</b>
V.1	Synthèse des résultats en vue de l'application aux verres ophtalmiques .....	150
V.2	Présentation de l'analyse .....	153
V.3	Comparaison des disparités horizontales calculées avec les seuils mesurés.....	155
<b>VI</b>	<b>Conclusion générale sur les disparités horizontales .....</b>	<b>158</b>
<b>Chapitre 5.</b>	<b>Combinaison des disparités horizontales et verticales .....</b>	<b>161</b>
<b>I</b>	<b>Introduction sur la manipulation des disparités verticales.....</b>	<b>161</b>
<b>II</b>	<b>Première expérience : disparités verticales en conflit ou congruente .....</b>	<b>163</b>
II.1	Matériel et Méthode.....	163
II.2	Résultats .....	166
II.2.1	Résultats globaux.....	167
II.2.2	Analyse détaillée des disparités verticales congruentes ou en conflit de forme 3D avec les disparités horizontales.....	171
II.3	Discussion.....	172
<b>III</b>	<b>Seconde expérience : disparités verticales dans un autre plan de profondeur .....</b>	<b>174</b>
III.1	Matériel et méthode.....	174
III.2	Résultats .....	176
III.2.1	Résultats globaux .....	176

III.2.2 <i>La disparité verticale selon son plan de profondeur</i> .....	178
III.3 Discussion .....	180
<b>IV L'application aux verres ophtalmiques .....</b>	<b>182</b>
IV.1 Synthèse des résultats des deux expériences en vue de l'application aux verres ophtalmiques .....	182
IV.2 Comparaison des disparités binoculaires calculées avec les seuils mesurés .....	185
IV.2.1 <i>Les disparités verticales</i> .....	185
IV.2.2 <i>Etude de la combinaison des disparités horizontales et verticales</i> .....	186
IV.3 Conclusion sur les disparités introduites par les verres ophtalmiques.....	187
<b>V Discussion générale et conclusion sur le rôle des disparités verticales.....</b>	<b>188</b>
<b>Chapitre 6. Synthèse des résultats et Conclusions .....</b>	<b>193</b>
<b>I Intérêt de l'étude.....</b>	<b>193</b>
<b>II La méthode .....</b>	<b>194</b>
<b>III Les variations selon l'excentricité .....</b>	<b>195</b>
<b>IV Les différences croisées-homonymes.....</b>	<b>196</b>
<b>V La combinaison des disparités horizontales et verticales .....</b>	<b>198</b>
<b>VI L'application aux verres ophtalmiques unifocaux .....</b>	<b>200</b>
<b>VII Perspectives.....</b>	<b>203</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>205</b>
<b>Lexique des termes de vision binoculaire .....</b>	<b>213</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>215</b>
<i>Annexe 1 - Représentation des différents repères de coordonnées sphériques monoculaires (d'après Howard et Rogers, 2002).....</i>	<i>217</i>
<i>Annexe 2 - Calcul de la profondeur physique produite par des disparités horizontales, croisées / homonymes.....</i>	<i>218</i>
<i>Annexe 3 - Programme de calcul des disparités à partir des grilles déformées.....</i>	<i>221</i>
<i>Annexe 4 - calcul de la résolution angulaire en fonction de l'excentricité et courbe représentative de la variation de la résolution angulaire en fonction de l'excentricité.....</i>	<i>242</i>
<i>Annexe 5 - Schéma électronique simplifié représentant le système de contrôle de la fixation par électro-oculographie.....</i>	<i>243</i>
<i>Annexe 6 - phraséologie pour l'expérience « seuils de détection de déformation d'une surface plane ».....</i>	<i>244</i>
<i>Annexe 7 - calculs sur les disparités binoculaires, horizontales et verticales.....</i>	<i>245</i>
<i>Annexe 8 - Programme de calcul d'images disparates : détail des calculs effectués par le programme.....</i>	<i>254</i>
<i>Annexe 9 - Formulaire d'information et de consentement de participation donné à remplir et signer aux observateurs.....</i>	<i>258</i>

<i>Annexe 10 - Calcul des écarts pupillaires vrais (dans le plan des pupilles) à partir de la mesure des écarts pupillaires au pupillomètre à reflets cornéens. ....</i>	<i>259</i>
<i>Annexe 11 – Données individuelles de l’analyse de l’influence des post-effets.....</i>	<i>260</i>
<i>Annexe 12 – Expérience de stimuli constants modifiée.....</i>	<i>271</i>
<i>Annexe 13 - Définitions des courbes psychométriques correspondant aux pourcentages de réponses dans une direction en fonction de la valeur de gradient de disparité, pour les deux expériences en stimuli constants et pour chaque observateur.....</i>	<i>275</i>
<i>Annexe 14 - Calcul de la disparité verticale d’un point en fonction de sa distance par rapport à l’observateur. ....</i>	<i>277</i>
<i>Annexe 15 - Calcul des disparités d’un anneau incliné déplacé par rapport au point de fixation.....</i>	<i>281</i>
<i>Annexe 16 - Résultats graphiques de la première étude des disparités verticales pour chaque observateur : les disparités verticales sont congruentes (2) ou en conflit (3) par rapport aux disparités horizontales. Dans la condition contrôle (1), les disparités verticales sont nulles. ....</i>	<i>286</i>
<i>Annexe 17 - Analyse de l’influence des disparités verticales, selon le plan pour chaque observateur.....</i>	<i>287</i>
<i>Annexe 18 - Résultats de l’analyse des disparités de plusieurs couples de verres ophtalmiques unifocaux. ....</i>	<i>289</i>



---

## ***Introduction***

### ***Pourquoi deux yeux plutôt qu'un...***

La perception visuelle, comme toute perception sensorielle, présente une dualité : le traitement de l'information visuelle et la représentation mentale de cette information. Le traitement de l'information visuelle comporte différents aspects : la perception des formes, des distances, du relief, des couleurs... L'extraction de ces informations contenues dans notre monde visuel va nous permettre, avec les autres informations sensorielles, d'agir ou de décider d'agir.

Le traitement de l'information de relief et de profondeur nous permet d'identifier la position des objets animés ou inanimés les uns par rapport aux autres. La vision stéréoscopique ou perception du relief et de la profondeur est nécessaire pour appréhender l'environnement, estimer les distances, éviter les obstacles. Le terme de « vision stéréoscopique » au sens littéral, signifie regarder [*skopein*, en grec] en trois dimensions, donc dans l'espace [*stereos*, solide en grec]. La vision du relief correspond à la perception visuelle de la troisième dimension, avec un seul œil ou les deux yeux (Howard, 2002). Avec un seul œil, il est possible de verser de l'eau d'une carafe dans un verre posé sur une table. Des indices dits monoculaires nous permettent d'évaluer la distance du filet d'eau par rapport aux bords du verre : la taille relative de la carafe et du verre, sachant que ces deux objets doivent être à même distance de l'observateur monoculaire, et par la connaissance que nous avons acquise depuis l'enfance de la taille d'un verre et de celle d'une carafe ; de même, selon la position de la source d'éclairage, l'ombre de la carafe par rapport au verre nous donne une indication supplémentaire ; ou encore, en bougeant la tête latéralement, si on fixe le verre, on saura si la carafe est en avant ou en arrière par son mouvement relatif... Tous ces indices monoculaires, qui peuvent être statiques ou dynamiques donnent une perception qualitative et quantitative du relief et de la profondeur des objets de la scène visuelle. Néanmoins, bien qu'un seul œil suffise, deux yeux donnent deux points de vue différents de la même scène : le décalage horizontal des deux yeux l'un par rapport à l'autre et la fusion binoculaire par

---

convergence des deux yeux sur un même point (le point fixé) produisent deux images rétiniennes légèrement différentes de la même scène visuelle autour du point de fixation. La convergence et les disparités binoculaires produites par le décalage des deux images rétiniennes sont des indices binoculaires qui donnent une information quantitative précise de la distance des objets (le verre et la carafe par exemple) par rapport à l'observateur, des objets entre eux et de la forme de ces objets.

Pourtant l'extraction de l'information tridimensionnelle à partir des indices binoculaires peut se trouver confrontée à des difficultés d'appariement des deux images rétiniennes. Le système visuel extrait les informations qui lui permettent de reconstruire un espace interne, perçu unique et en trois dimensions, tout en inhibant par des mécanismes de suppression et de rivalités binoculaires les images conflictuelles.

# **Chapitre 1. Perception stéréoscopique et disparités binoculaires**

## ***1 Généralités sur la perception du relief et de la profondeur***

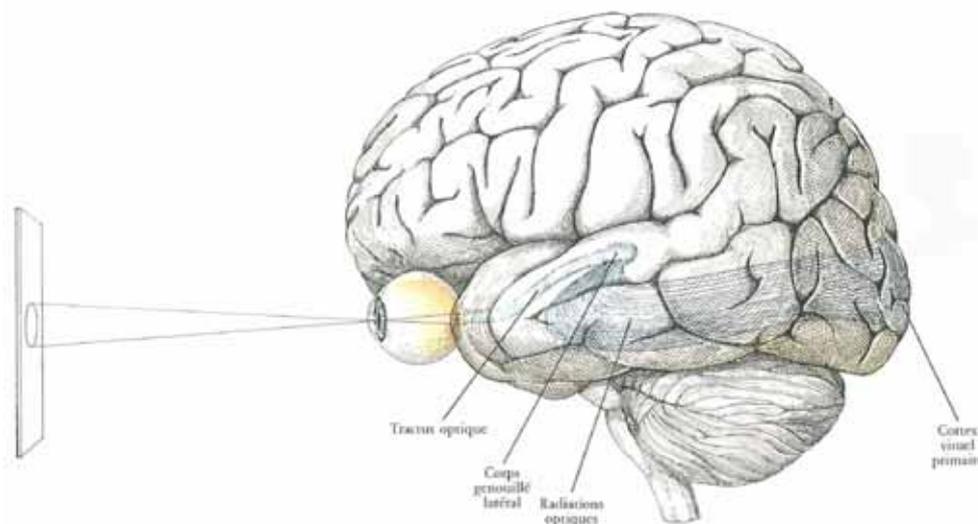
Pour introduire la vision stéréoscopique, il est nécessaire de rappeler quelques bases anatomiques et physiologiques du système visuel, de l'existence de deux yeux au trajet de l'influx nerveux jusqu'au système nerveux central, sans oublier les muscles extra-oculaires qui permettent la mobilité de l'œil dans son orbite. Ensuite vient la perception visuelle, et plus exactement la perception du relief et de la profondeur qui est réalisée à l'aide d'indices monoculaires et binoculaires, sachant que ces derniers nécessitent une vision binoculaire. Enfin, l'indice qui nous intéresse dans cette étude est la disparité binoculaire, que nous commencerons par définir géométriquement.

### **1.1 Anatomie du système visuel**

L'appareil sensoriel de la vision est spécifique chez l'être humain. Il est constitué de deux récepteurs, les yeux ou globes oculaires qui sont placés symétriquement de part et d'autre du plan sagittal de la tête, et dans un plan frontal. Cette disposition frontale des yeux permet aux êtres humains d'obtenir deux images légèrement décalées horizontalement de l'espace visuel. Chacun des deux yeux présente un champ visuel monoculaire d'environ 150°. Ce champ visuel est plus large du côté temporal que du côté nasal (à cause de la saillie de l'os nasal). La particularité du système visuel humain, que l'on peut retrouver également dans le règne animal chez les prédateurs, est que les deux champs visuels droit et gauche se recouvrent sur une large zone (environ 120°) autour du point de fixation sur lequel convergent les axes visuels des deux yeux. Cette zone de 120° constitue donc un champ visuel binoculaire, nécessaire à l'existence de la vision binoculaire et permettant une perception plus précise de la profondeur et du relief.

Les images pour chaque œil se projettent sur la rétine, qui est la tunique interne de l'œil constituée notamment de photorécepteurs (les cônes et les bâtonnets). Les photorécepteurs vont envoyer les signaux, correspondant à l'image projetée, par les voies visuelles qui relient la rétine au cortex visuel primaire (Figure 1). Ces voies visuelles font déjà partie du système nerveux central, elles commencent par les cellules bipolaires qui font synapse avec les cellules ganglionnaires, se situant encore dans l'épaisseur de la rétine et dont les axones quittent la rétine par la papille (point aveugle, dans la région nasale de la rétine) pour constituer le nerf optique. Notons que dans l'épaisseur de la rétine, outre les voies

directes, ou verticales, formées par les photorécepteurs, les cellules bipolaires et les cellules ganglionnaires, d'autres cellules nerveuses ou interneurons participent à la régulation de la transmission de l'information visuelle : les cellules horizontales, agissant au niveau de la synapse entre les photorécepteurs et les cellules bipolaires ; et les cellules amacrines, agissant au niveau de la synapse entre les cellules bipolaires et les cellules amacrines ; et les cellules interplexiformes, régulant les interactions des deux synapses précédentes. Ces interneurons propagent le signal latéralement dans la rétine, il s'agit de la voie latérale, indirecte. Le nerf optique véhicule l'influx nerveux par les axones des cellules ganglionnaires qui font un relais synaptique dans le corps genouillé latéral, ce dernier se trouve dans le thalamus. Juste avant, les deux nerfs optiques se réunissent pour former le chiasma optique. Dans le chiasma, les fibres nerveuses subissent une semi-décussation : les fibres provenant de la partie temporale de la rétine sont directes, elles se dirigent vers l'hémisphère cérébral ipsi-latéral ; les fibres provenant de la partie nasale de la rétine sont croisées, elles rejoignent l'hémisphère cérébral contra-latéral. Ainsi le champ visuel droit, qui se projette sur la rétine temporale de l'œil gauche et la rétine nasale de l'œil droit, est traité par le cerveau gauche et réciproquement le cerveau droit reçoit les informations correspondant au champ visuel gauche. Du chiasma, les bandelettes optiques se terminent dans les corps genouillés latéraux. Du corps genouillé latéral partent des fibres en direction du cortex visuel primaire, ou cortex strié, ou aire V1 (l'aire 17 dans la classification de Brodmann). Les fibres thalamo-corticales forment les radiations optiques. Du cortex visuel primaire, l'information va se diriger vers un certain nombre d'autres aires corticales (V2, V4, V5, ...).

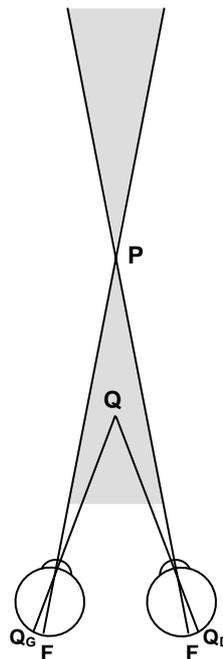


**Figure 1 - Schéma représentant le trajet des signaux visuels envoyés par l'image à l'œil jusqu'au cortex visuel en passant par la voie optique (d'après Hubel, 1988).**

Les voies visuelles transmettant l'information visuelle captée par l'œil vers le cerveau atteignent le cortex occipital : les objets du champ visuel droit sont « vus » par l'hémisphère gauche et réciproquement les objets du champ visuel gauche par l'hémisphère droit. Chaque

hémisphère reçoit des informations des deux yeux séparément par des cellules monoculaires, et une grande proportion de cellules « binoculaires » de l'aire 17 (chez le singe) reçoit des informations provenant des deux yeux. Les signaux provenant des yeux sont monoculaires jusqu'au corps genouillé latéral. Les cellules binoculaires sont nécessaires pour que la perception binoculaire du relief existe. Les cellules de l'aire V2 (aire 18 chez le singe) répondent mieux que V1 (aire 17) à la présentation dichoptique de stimulations légèrement différentes.

Notons l'importance du corps calleux dans la stéréopsie (Hubel, 1988) : le corps calleux est une bande de fibres myélinisées reliant les deux hémisphères cérébraux, au niveau de la bordure entre les aires visuelles 17 et 18. Si les yeux fixent un point P, soit un point Q en avant de P, à l'intérieur de l'angle de convergence (formé par P avec les deux fovéas), les images rétinienne  $Q_G$  et  $Q_D$  tombent sur les rétines temporales (Figure 2) :  $Q_G$  se projette donc dans l'hémisphère gauche et  $Q_D$  dans l'hémisphère droit. Il est donc nécessaire que le corps calleux soit intact, pour faire le lien entre les deux hémisphères et permettre une stéréopsie dans cette région du champ visuel, située à l'intérieur de l'angle de convergence des axes visuels. De plus, la section du corps calleux entraîne une réduction significative de la binocularité des cellules de l'aire 17 du chat (Payne *et al.*, 1980).



**Figure 2 - La section du corps calleux entraîne la perte de la vision stéréoscopique dans la partie du champ visuel grisée (d'après Hubel, 1988).**

Les deux yeux, pour percevoir une seule image, doivent faire converger leur axe visuel en un même point, le point de fixation. La convergence des yeux en un point est nécessaire pour la fusion binoculaire. Elle est rendue possible par la capacité des yeux à se mouvoir à l'intérieur de leur orbite, grâce aux muscles extra-oculaires. Les muscles extra-oculaires,

striés, produisent la motricité des yeux selon leurs insertions dans l'orbite et sur le globe, ils sont au nombre de six (Figure 3) : quatre muscles droits, dont deux muscles horizontaux (droit interne et droit externe) et deux muscles verticaux (droit supérieur et droit inférieur), et deux muscles obliques (petit oblique et grand oblique). Les muscles droits interne et externe ont une action uniquement horizontale, d'adduction pour le droit interne et d'abduction pour le droit externe. Les quatre autres muscles ont plusieurs actions combinées : une action verticale, d'élévation pour le droit supérieur et le petit oblique et d'abaissement pour le droit inférieur et le grand oblique ; une action d'intorsion pour le droit supérieur et le grand oblique et d'extorsion pour le droit inférieur et le petit oblique ; et une action horizontale, d'adduction pour les droits supérieur et inférieur et d'abduction pour les grand et petit obliques.

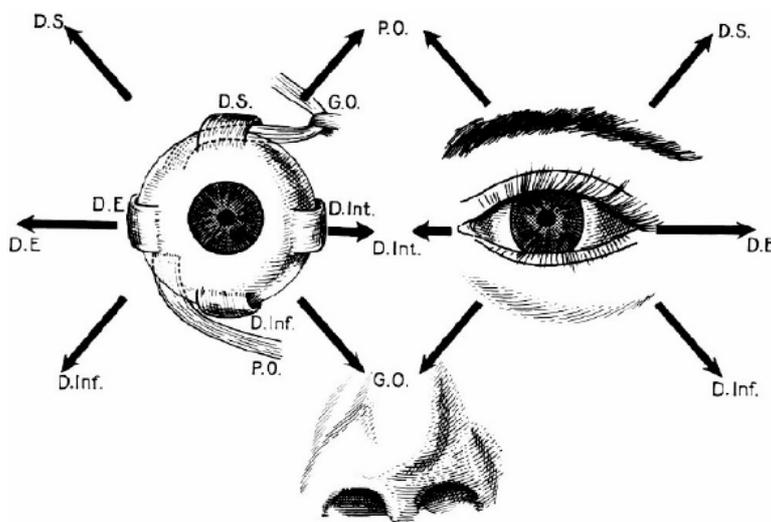


Figure 3 - Schéma des six muscles extra-oculaires et leur action, vue antérieure (d'après Legent *et al.*, 1976). D.S., Droit Supérieur ; D.E., Droit Externe ; D.Inf., Droit Inférieur ; G.O., Grand Oblique ; D.Int., Droit Interne ; P.O., Petit Oblique.

La convergence pure fait essentiellement intervenir les muscles horizontaux, on parlera de convergence symétrique dans le cas de la contraction conjointe et égale des muscles droits internes, droit et gauche et le relâchement des muscles droits externes, droit et gauche.

Les deux points de vue monoculaires d'une même scène ou la convergence des yeux font partie des indices permettant au cerveau de reconstruire la troisième dimension.

## I.2 Les indices de perception du relief et de la profondeur

Les caractéristiques géométriques du monde physique liées à la troisième dimension sont : d'une part, la distance absolue, ou *profondeur*, qui mesure la distance d'un objet par rapport à l'observateur (notion égocentrique), la distance relative, ou *relief*, qui mesure la distance de deux objets entre eux (notion exocentrique). Le relief indique d'une manière plus générale la perception de l'orientation ou de la courbure d'une surface.

La propriété principale de la vision binoculaire est d'évaluer les relations de profondeur et de distance entre les objets et les surfaces qui constituent notre monde visuel. Cette propriété, appelée *stéréopsie*, est due à l'existence de deux images rétiniennes disparates dont la comparaison par le système visuel permet, sur la base de la parallaxe géométrique, de reconstituer avec précision la perception de la troisième dimension.

Mais cette stéréopsie n'est pas indispensable à la perception de la troisième dimension, le monde visuel nous apparaît sensiblement le même en vision monoculaire et en vision binoculaire : il existe de nombreux indices monoculaires de la perception des distances et de la profondeur qui interagissent avec les indices binoculaires ou qui se substituent à ces indices lorsque la vision binoculaire n'est pas ou plus efficace.

La perception de la profondeur est rendue possible grâce à des indices monoculaires et binoculaires présents dans l'environnement visuel. Pour Cutting et Vishton (1995), quinze indices peuvent être dégagés, répartis en neuf principaux et six secondaires qui sont toujours associés à un ou plusieurs indices principaux. Les neuf sources principales d'information sont les suivantes : l'occultation, la taille relative, la densité relative, la hauteur dans le champ visuel, la perspective aérienne, la perspective de mouvement, la convergence, l'accommodation et la disparité binoculaire. Les six autres sources sont les gradients de texture, la perspective linéaire, la luminance et l'ombre, la profondeur cinétique, l'occultation cinétique et la « désoccultation », et enfin la gravité.

Certains indices sont plutôt pertinents pour le relief, c'est le cas par exemple de la taille relative ou l'occultation, et d'autres indices plutôt pertinents pour la profondeur, telles que la perspective linéaire ou la hauteur dans le champ visuel. De même, tous les indices n'ont pas la même efficacité sur la perception du relief selon la zone de l'espace visuel considérée (Figure 4). Cutting et Vishton (1995) ont défini trois espaces en fonction de la distance d'observation : un espace « personnel » (jusqu'à 2 m), un espace de l'action (entre 2 et 30 m), et un espace éloigné (au-delà de 30 m).

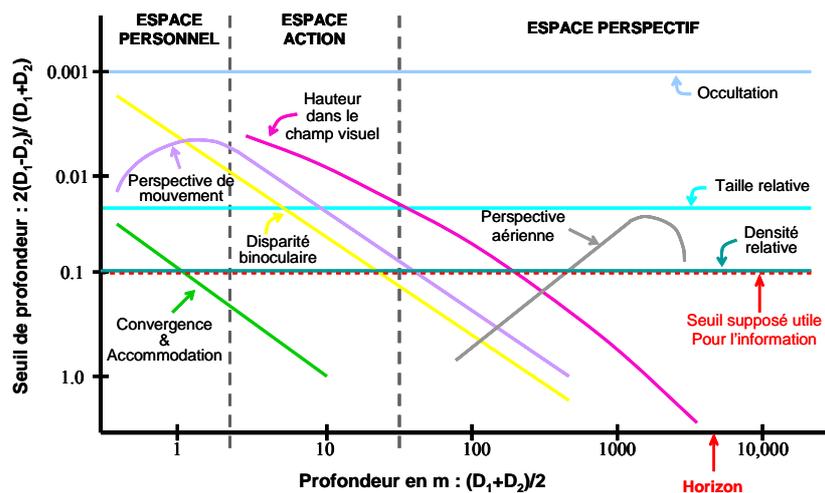


Figure 4 - Représentation schématique de l'efficacité (en seuil de profondeur) des neuf indices principaux de perception de la profondeur en fonction de la distance par rapport à l'observateur (d'après Cutting et Vishton, 1995).

Enfin, les interactions entre les indices de profondeur peuvent conduire soit à l'amélioration de la perception de la profondeur quand ils s'ajoutent, soit à sa détérioration (on parle alors de conflit d'indices) quand ils s'opposent.

### I.2.1 Les indices monoculaires

Les indices monoculaires peuvent être classés selon les trois catégories suivantes :

- Les *indices picturaux*, qui sont tous les éléments d'une photo ou d'un tableau qui permettent d'imaginer la troisième dimension de la scène réelle prise en photo ou de la scène imaginée par l'artiste. Ces indices picturaux peuvent être photométriques (la perspective aérienne, les ombres, le brillant, la transparence) ou géométriques (la perspective, le flou, la hauteur dans le champ visuel, la taille relative, la texture, l'occultation), et bien sûr cognitifs (la taille familière). Tous ces indices vont également être utilisés de manière astucieuse pour représenter qualitativement une forme tridimensionnelle (Koenderink, 1990) : par exemple, ajouter de l'ombre à l'intérieur d'un cercle permet de lui donner l'aspect tridimensionnel d'une sphère.
- Les *indices cinétiques*, que constituent la parallaxe de mouvement et la perspective de mouvement. Ces indices s'intéressent au mouvement de la tête par rapport à la scène visuelle, ou le mouvement de la scène par rapport à l'observateur, ou flux optique. L'indice de parallaxe repose sur le fait que, lorsque l'on fixe un point et que l'on bouge la tête, le point fixé garde la même position rétinienne (par mouvements des yeux pour compenser les mouvements de la tête). Par contre, les images des objets en avant du point de fixation vont se déplacer dans la direction opposée à celle de la tête et les images d'objets en arrière dans la même direction que la tête. De plus, la vitesse de déplacement de l'image renseigne sur la distance de l'objet par rapport au point de

fixation, plus la vitesse est grande et plus l'objet est éloigné du point de fixation. La vitesse et la direction du mouvement des objets donnent donc une information sur la distance de ces objets par rapport au plan de fixation.

- Les *indices accommodatifs*, liés à l'accommodation, sont : la mise au point, le flou et l'accommodation elle-même et ses variations. Ces indices font intervenir la fonction physiologique et généralement réflexe produite par modification de la forme du cristallin, par les muscles ciliaires, qui permet la focalisation de l'image d'un point sur la rétine en faisant varier la puissance réfractive de l'œil. Le système visuel utilise cette modification physiologique, lui indiquant l'état de repos ou non du cristallin, pour estimer la distance des objets par rapport à l'observateur ou la distance des objets entre eux.

Les indices de perception du relief sont qualifiés par leur *efficacité* qui correspond au seuil de profondeur perçue en fonction de la distance : plus ce seuil est faible, plus l'indice est considéré comme efficace. Il s'agit d'un seuil de distance équivalent au calcul de la sensibilité au contraste dans le domaine des fréquences spatiales, soit  $\frac{2(D_1 - D_2)}{D_1 + D_2}$ , où  $D_1$  et  $D_2$  sont les

distances de deux objets (Figure 4). L'efficacité des indices monoculaires peut varier avec la distance par rapport à l'observateur, elle peut également être différente selon la tâche, l'activité ou les conditions (de luminance par exemple). L'occlusion, quand un objet en cache un autre, donne une information qualitative de la profondeur, qui reste pertinente quelle que soit la distance. Pourtant, son efficacité, supérieure aux autres indices, dépend de la taille de l'objet considéré (feuille de papier, personne, voiture, maison).

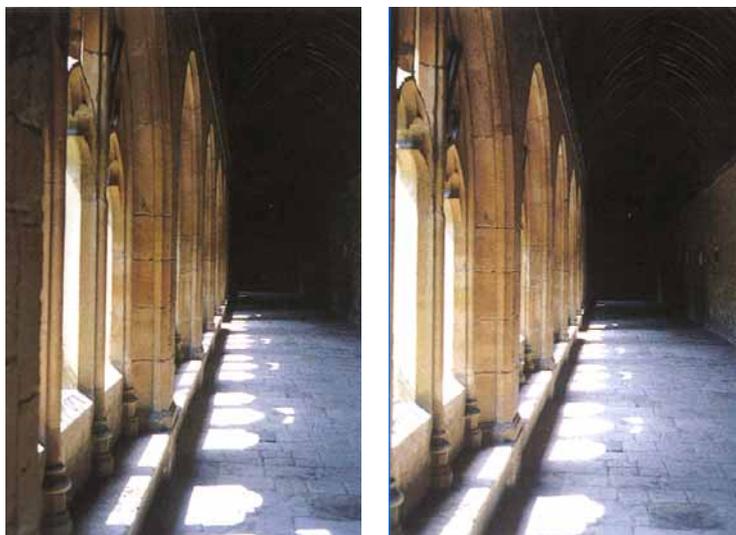
La perspective de mouvement, ou les mouvements de tout le champ des objets, est un indice relativement pertinent à proximité, mais son « efficacité » diminue avec l'éloignement par rapport à l'observateur. La direction de regard par rapport au sens de mouvement peut également en modifier l'efficacité, de même entre un piéton, un conducteur de voiture ou de train à grande vitesse l'importance de l'indice de perspective de mouvement sera différente (Cutting et Vishton, 1995). Enfin, la distance absolue perçue correspond à la distance simulée, jusqu'à 3 m, lors du mouvement latéral de translation de l'individu. Comparativement, quand l'individu est immobile et les objets se déplacent, la performance est moindre, suggérant une évaluation des indices de mouvement visuel par des informations extra-rétiniennes (Panerai *et al.*, 2002). Par ailleurs, l'appréciation de la distance absolue semble meilleure avec des mouvements sagittaux de la tête qu'avec des mouvements latéraux de la tête. Cette meilleure coordination peut être associée à des mouvements couramment réalisés dans les activités habituelles (Peh *et al.*, 2002).

La position de la source lumineuse affecte directement la perception de la forme tridimensionnelle d'un objet, par les ombrages qui se dessinent sur l'objet selon sa forme. Les

sources lumineuses sont généralement multiples, incluant également des réflexions secondaires ou la diffusion de la lumière (le soleil à travers des nuages épais par exemple). Pourtant l'efficacité de cet indice semble maximale pour une source lumineuse située en haut à gauche, et plus précisément  $26^\circ$  vers la gauche par rapport à la verticale (Mamassian, et Goutcher, 2001).

### **1.2.2 Les indices binoculaires**

Les indices binoculaires sont la vergence (convergence/accommodation) et les disparités (positionnelles, géométriques, luminances). Ces indices sont dits binoculaires puisqu'ils reposent sur l'existence de deux yeux qui orientent leur axe de regard vers une même cible (convergence), qui perçoivent chacun une image légèrement différente (disparités) de la même scène visuelle (Figure 5).



**Figure 5 - Illustration de la disparité binoculaire** (d'après Hubel, 1988) : la même scène visuelle est perçue légèrement décalée pour un œil par rapport à l'autre, ici l'image droite par rapport à celle de gauche.

L'indice de vergence donne la valeur de l'angle que font les axes visuels des deux yeux pour fixer un point. La convergence et l'accommodation sont liées, puisque la modification de vergence entraîne de façon réflexe une variation de l'accommodation et inversement. L'accommodation et la convergence sont efficaces à proximité, mais de moins en moins avec l'éloignement. Notons qu'avec l'âge la réserve accommodative diminue, on parle alors de presbytie. L'accommodation est réalisée par le muscle ciliaire qui, lors de sa contraction, modifie la forme du cristallin afin d'augmenter la puissance réfractive du cristallin pour faire la mise au point sur un objet à proximité. Le sujet presbyte perd progressivement la faculté de focalisation de l'image sur la rétine en vision de près. L'accommodation devient très faible, entraînant une efficacité moindre en temps qu'indice.

La disparité binoculaire correspond aux différences de position relative des projections d'un même objet sur les deux rétines. Dans le cas où les disparités sont trop importantes pour

être fusionnées, la diplopie peut pourtant être une source d'information de profondeur relative (Duwear et van den Brink, 1981) (cf. § I.2.3). L'efficacité de la disparité binoculaire s'atténue linéairement avec l'augmentation de la distance par rapport à l'observateur. Dans l'espace le plus proche, dit « personnel » (jusqu'à 2 mètres devant l'observateur), c'est l'indice de perception du relief le plus pertinent (Cutting et Vishton, 1995). Notons que son efficacité dépend néanmoins de la qualité de la vision stéréoscopique.

### **I.2.3 Les limites physiologiques de la fusion binoculaire**

Pour utiliser les indices binoculaires de la perception du relief, il faut fusionner les deux images, même si une perception de relief est possible avec des images doubles. Différents problèmes, visuels ou oculomoteurs (amblyopie, strabisme, paralysie oculomotrice, etc.), peuvent empêcher toute vision binoculaire et donc également la vision stéréoscopique. Ces problèmes peuvent détériorer la perception de la profondeur, mais essentiellement par les indices binoculaires donnant une appréciation tridimensionnelle plus précise, les indices monoculaires restant néanmoins présents pour donner une appréciation plus grossière du relief.

La pratique orthoptique définit trois degrés de la vision binoculaire sur lesquels elle base son examen clinique de la vision binoculaire (Hugonnier, 1959). Ces trois degrés de vision binoculaire sont : (1) la perception simultanée ou biocularité, le fait de percevoir les images vues par les deux yeux, superposées et simultanément, ce premier degré permet de vérifier l'absence de neutralisation ou suppression d'une des deux images ; (2) la fusion ou binocularité, la capacité à fusionner les images droite et gauche pour n'en faire qu'une, indiquant une correspondance rétinienne normale ; (3) la vision stéréoscopique, l'impression de relief produite par deux points de vue différents d'un même objet. La vision du relief ou vision stéréoscopique est l'ultime étape de la vision binoculaire. Ce troisième degré ne serait atteint que si les deux autres degrés existent. En d'autres termes, la stéréopsie nécessite une vision simultanée des deux yeux et la fixation bifovéale du même objet (Ogle, 1950). La perception du relief et le processus de fusion binoculaire sont donc étroitement liés, ils doivent avoir lieu en parallèle, ou bien en tant qu'interaction « co-opérative » (Julesz, 1971).

Le mécanisme de fusion est caractérisé par des aires fusionnelles de Panum : un stimulus d'une rétine peut être physiologiquement fusionné avec des stimuli identiques dans un certain domaine autour du point précis de correspondance de l'autre rétine. L'étendue et la forme des aires de Panum sont fortement dépendantes des caractéristiques locales du stimulus. Selon Tyler (1983), l'aire de Panum est une entité dynamique qui s'adapte continuellement aux formes générales de l'environnement des stimuli (Figure 6). La taille des aires fusionnelles augmente en périphérie, et montre d'importantes variations interindividuelles (Ogle, 1950 ; Drobe *et al.*, 1997).

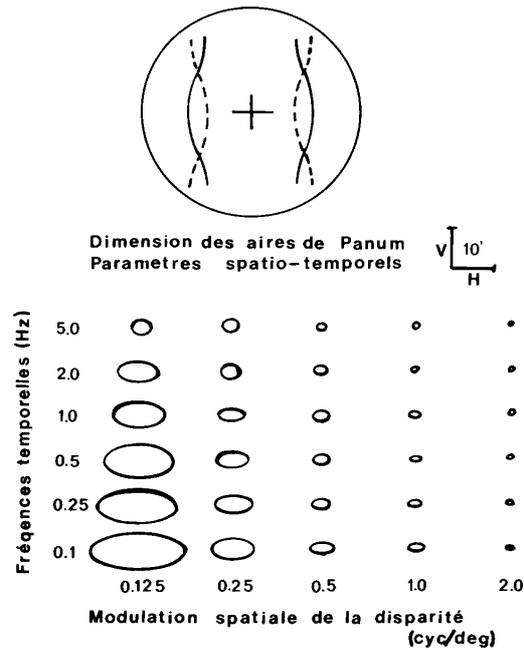


Figure 6 - Effet des paramètres spatio-temporels sur les dimensions des aires de Panum (d'après Schor et Tyler, 1981) : stimulus utilisé (en haut) les lignes continues correspondant à un œil et les lignes en pointillé à l'autre œil ; dimensions horizontale et verticale des aires de Panum (en bas) en fonction de la fréquence spatiale en abscisse et de la fréquence temporelle en ordonnée.

Cependant, la fusion n'est pas totalement indispensable à la perception du relief. La courbe de la profondeur perçue en fonction de la disparité binoculaire (Figure 7) suggère en effet qu'au-delà de la limite de fusion des images, en diplopie, la perception du relief est possible, elle est même maximale sous cette condition diplopie. Cependant, en dehors des limites des aires de Panum, le relief perçu devient inférieur au relief objectif avec l'augmentation de la disparité, d'abord progressivement puis rapidement (Ogle, 1953 ; Westheimer et Tanzman, 1956). Et, au-delà de 2° de disparité ou plus – selon le stimulus –, la perception de profondeur devient nulle. La disparité donnant la perception maximale de relief correspond plutôt à une limite floue de l'aire de Panum et représenterait la limite entre la pyknostéréopsie et la diastéréopsie, que nous décrivons dans le paragraphe II.1.4 (Tyler, 1983 ; Tyler, 1991).

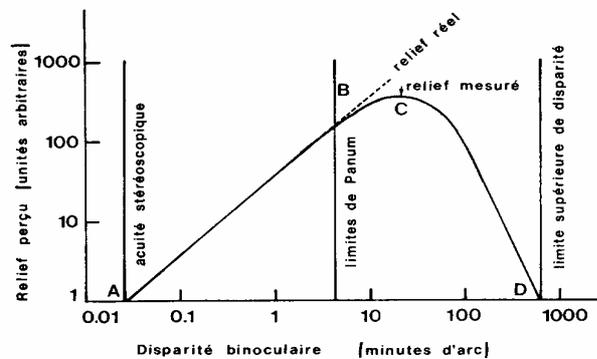


Figure 7 - schéma des limites stéréoscopiques du relief perçu et de la fusion en fonction de la disparité binoculaire (Tyler, 1983).

La fusion est possible dans les deux directions, horizontale et verticale (Tyler, 1975). Les disparités verticales sont également en relation directe avec le système de fusion, leur présence peut causer une diplopie plus facilement que les disparités horizontales. Des disparités verticales aussi petites qu'une minute d'arc peuvent être hors du champ de fusion, pour des stimuli utilisant des détails fins se déplaçant rapidement (Schor et Tyler, 1981).

Lorsque des images sensiblement similaires en nature, localisation et forme sont transmises aux centres visuels, par les deux yeux, les informations contenues dans chacune des images sont combinées pour donner une perception simple de l'espace physique. Cet équilibre peut être détruit quand deux images très différentes spatialement sont présentées sur des zones rétiniennes correspondantes des deux yeux : le système visuel réduit la visibilité d'une des deux images par rapport à l'autre, il y a coupure temporaire de la stimulation physique et conscience de la perception visuelle qui pourrait avoir pour origine les centres de l'attention (Fox, 1991). Deux cas peuvent alors se présenter : les deux images alternent dans le temps, il y a dominance d'un œil puis de l'autre, c'est le phénomène de *rivalité binoculaire* ; une des images est totalement supprimée, il y a dominance d'un œil sur l'autre, c'est le phénomène de *suppression binoculaire*. Concernant la rivalité binoculaire, l'alternance de dominance et de suppression a été largement étudiée, les études psychophysiques indiquant que les facteurs déterminants des phases de suppression d'un stimulus (le contraste, par exemple) sont différentes de ceux des phases de dominance (le contexte global, par exemple). Les études neurologiques (IRM fonctionnelle, MEG...) ont montré qu'un stimulus dominant dans la rivalité entraîne la même activation neurale qu'en situation de non-rivalité, mais pendant les phases de suppression se produit des interruptions du traitement neural (Blake et Logothetis, 2002).

Par définition, tout objet de l'espace qui ne se projette pas sur des points rétiniens correspondants produit des images disparates. Quand la disparité est grande, supérieure à la taille des aires de Panum, l'objet peut apparaître double : il y a *diplopie*. Inversement, des objets différents peuvent se projeter sur des points rétiniens correspondants et ces conflits sont rarement perçus. Ainsi l'espace binoculaire confronte géométriquement le système visuel avec un grand nombre d'informations conflictuelles, le mécanisme de suppression binoculaire permet de résoudre ces conflits. Les phénomènes de suppression et de rivalité représentent une réponse adaptative aux problèmes posés par un conflit dans la localisation visuelle des objets et du corps dans l'environnement naturel.

Les deux yeux convergent sur un même point, le point de fixation, permettant ainsi de fusionner les images rétiniennes de chaque œil. Ces deux images rétiniennes présentent des disparités binoculaires dans tout le champ, à l'exception du point de fixation ayant permis la fusion. Nous allons à présent nous intéresser plus en détail à l'indice binoculaire de perception de la profondeur et du relief que constitue la disparité binoculaire. Puis nous

essaierons de comprendre comment le système visuel extrait la disparité binoculaire sur l'ensemble du champ visuel pour ensuite la traduire en structure tridimensionnelle.

### I.3 L'indice de disparité binoculaire

La disparité binoculaire considère deux points de vue d'une même scène, obtenus par chacun des deux yeux, il s'agit donc d'un indice binoculaire, contrairement aux indices monoculaires qui se basent sur un seul point de vue. Néanmoins ce point de vue peut se déplacer, et l'analogie entre la disparité binoculaire et la parallaxe de mouvement peut aisément être faite, si l'on considère un œil virtuel qui se déplacerait de la position de l'œil gauche vers celle de l'œil droit. La parallaxe de mouvement correspond au déplacement de l'œil par rapport à la cible, l'analyse des deux images de la cible entre la position à  $T+\delta t$  et la position au temps  $T$  permet de reconstruire le relief et la profondeur de la cible. Dans le cas de la disparité, plutôt que de déplacer un œil entre deux points de vue séparés horizontalement dans un plan frontal, l'œil est dupliqué de sorte que, au temps  $T$ , les deux points de vue sont perçus simultanément ( $\delta t$  tend vers zéro). Pour la parallaxe de mouvement, il s'agit de la présentation successive monoculaire de deux images, quand la présentation des mêmes images est simultanée et binoculaire pour la disparité binoculaire (de Valois et de Valois, 1988). L'analogie entre la disparité binoculaire et le mouvement doit également exister au niveau de leur extraction et de leur traitement : la parallaxe de mouvement et la disparité binoculaire sont sensibles à la même gamme de fréquences spatiales de corrugation (très faibles), avec un pic de sensibilité semblable (Rogers et Graham, 1982).

#### I.3.1 Définition

Les disparités binoculaires, ou parallaxe binoculaire, sont les différences de position relative des projections du même objet sur les rétines des deux yeux (Figure 8).

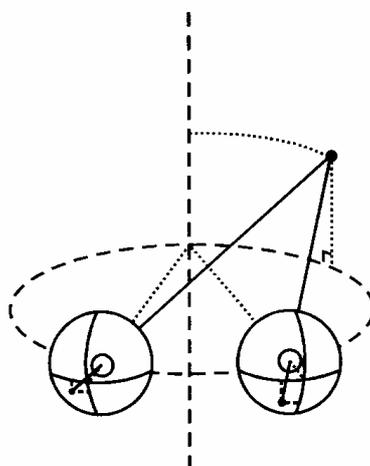


Figure 8 - Schéma illustrant la disparité rétinienne (Tyler, 1983).

La Figure 8 illustre la disparité rétinienne pour un point unique du champ visuel, ou point « disparate ». Ce point est vu sous un angle apparent, correspondant à l'angle compris entre les droites reliant le point en question au point nodal de chaque œil. La disparité binoculaire peut également être définie comme la différence entre cet angle apparent et l'angle de convergence des deux yeux sur le point fixé (droit devant dans cet exemple). La disparité, dans sa dimension angulaire, peut également être définie comme la différence des angles compris entre les droites reliant le point nodal d'un œil au point de fixation d'une part et au point étudié d'autre part, pour chaque œil. Cette différence angulaire équivaut à la différence entre l'angle apparent du point disparate et l'angle de convergence.

La disparité binoculaire peut également être représentée sous une forme vectorielle (Figure 9) : considérant le plan fronto-parallèle passant par le point de fixation (le plan de fixation), le prolongement sur ce plan des droites reliant le point nodal de chaque œil au point disparate fournit deux points, l'un étant la projection du point disparate pour l'œil droit et l'autre pour l'œil gauche. Les points image pour l'œil droit et pour l'œil gauche peuvent être reliés par un vecteur désignant la disparité binoculaire dans le plan de fixation. A présent, prenons un ensemble de points disparates du champ visuel. Les projections sur le plan de fixation de tous ces points pour chacun des deux yeux donnent autant de vecteurs qu'il y a de points disparates. Toutes ces projections vectorielles dans le plan de fixation donnent un champ de vecteur correspondant aux disparités binoculaires présentes dans le champ visuel étudié. La définition vectorielle des disparités est généralement choisie pour la représentation graphique des disparités présentes dans le champ visuel, car la dimension des vecteurs dépend de la distance du plan de fixation.

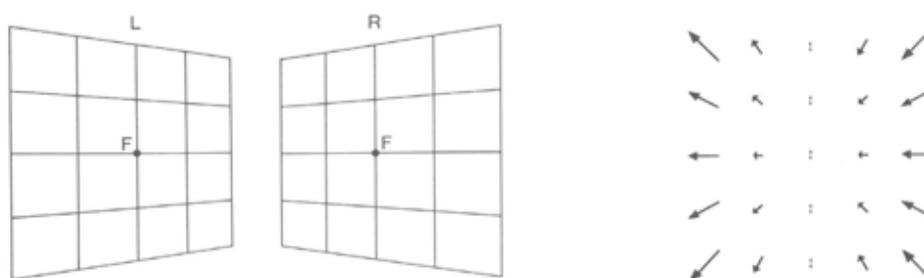


Figure 9 - Représentation des disparités binoculaires, correspondant à la combinaison des images de l'œil gauche (L) et de l'œil droit (R), sous la forme vectorielle (à droite).

L'utilisation des disparités angulaires implique la définition préalable d'un repère centré sur chaque œil. Ce choix de repère conditionne par la suite les valeurs angulaires utilisées et la décomposition communément faite en une composante horizontale et une composante verticale des disparités binoculaires.

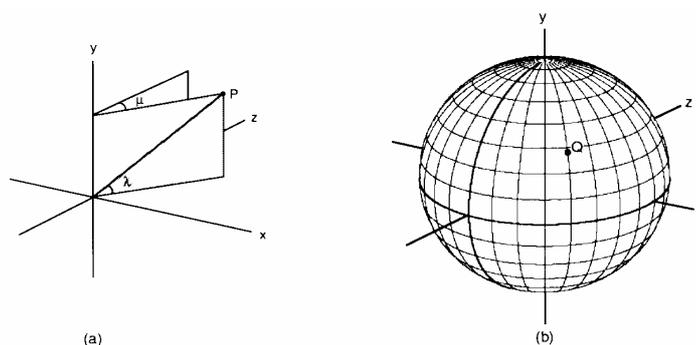
### I.3.2 Les différents repères

La nature et la mesure des disparités dépendent du choix du système de coordonnées utilisé pour mesurer les images (Howard et Rogers, 1995).

En coordonnées monoculaires, plusieurs repères peuvent être choisis (cf. Annexe 1) :

- Axes longitudinal-azimut / longitudinal-élévation
- Axes longitudinal-azimut / latitudinal-élévation
- Axes latitudinal-azimut / longitudinal-élévation
- Axes latitudinal-azimut / latitudinal-élévation
- Coordonnées polaires

L'utilisation binoculaire de ces différents repères (duplication du système de coordonnées monoculaires pour chaque œil) dépend de la présence de mouvements horizontaux ou verticaux de l'œil. Dans le système visuel humain, il est important que les disparités ne soient pas affectées par les mouvements de vergence et de version horizontale. Le seul repère qui respecte cette condition correspond aux axes longitudinal-azimut / latitudinal-élévation (Figure 10).

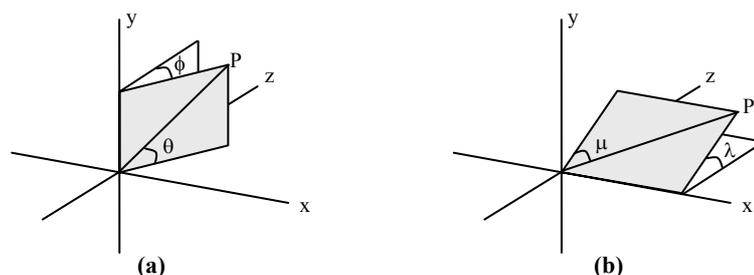


**Figure 10 - axes longitudinal-azimut/latitudinal-élévation** (Howard et Rogers, 1995) :

- (a) *L'azimut est l'angle dièdre  $\mu$  entre le plan vertical passant par le point P et le plan d'azimut zéro. L'élévation  $\lambda$  est mesurée dans le plan azimutal contenant le point P.*
- (b) *Représentation des projections des points de même azimut (lignes longitudinales nord-sud) et des projections des points de même élévation (cercles parallèles ou lignes de latitude autour de y)*

Ce système de coordonnées est semblable au système de Fick utilisé dans l'étude des mouvements oculaires, avec l'azimut par rapport au plan sagittal de la tête. L'étude des mouvements oculaires fait également référence au système de Helmholtz qui correspond au repère monoculaire azimut-latitudinal et élévation-longitudinale où l'élévation est mesurée par rapport au plan transverse de la tête (Howard et Rogers, 1995). Les systèmes de Fick et Helmholtz ont ainsi été définis pour décrire les mouvements oculaires (Lemij, 1990). Dans le système de Fick, l'axe vertical est fixé dans la tête, une rotation horizontale de l'œil est décrite en termes de longitude ( $\phi$ ) et une rotation verticale en terme de latitude ( $\theta$ ). Dans le

système d'Helmholtz, c'est l'axe horizontal qui est fixé, et les rotations horizontales et verticales sont décrites en azimut ( $\mu$ ) et élévation ( $\lambda$ ) (Figure 11). Pour les mouvements oculaires, le système le plus adapté est le système d'Helmholtz : pour une position tertiaire des yeux (mouvement horizontal et vertical combiné), chaque œil aura la même élévation car les deux yeux ont le même axe, horizontal, fixe. Tandis que dans le système de Fick, les deux yeux n'auront pas la même latitude, car la latitude dépend de la longitude qui est différente pour chaque œil, les centres de rotation des deux yeux ne coïncidant pas.



**Figure 11 - Les systèmes de coordonnées de Fick et de Helmholtz utilisés pour les mouvements oculaires :**

- (a) Représentation des angles de longitude  $\phi$  et de latitude  $\theta$  définissant le système de coordonnées Fick (azimut-longitudinal / élévation-latitudinale).
- (b) Représentation des angles d'azimut  $\mu$  et d'élévation  $\lambda$  définissant le système de coordonnées Helmholtz (azimut-latitudinal / élévation-longitudinale).

Le système de coordonnées le plus adapté aux mesures des disparités binoculaires, et le plus couramment utilisé, est le repère azimut longitudinal / élévation latitudinale, correspondant au système de Fick : avec ce repère, les mesures des disparités horizontale et verticale ne sont pas affectées par les mouvements de vergence et de version horizontale.

Notons que ce choix de coordonnées a contraint les études sur les disparités binoculaires à la simplification en une composante horizontale, la disparité horizontale, et une composante verticale, la disparité verticale. Le choix de repères monoculaires en coordonnées polaires, ou système périmétrique (cf. Annexe 1), aurait abouti à une toute autre approche et interprétation du traitement des disparités, définies dans ce cas en termes de direction et d'excentricité. En effet, rien ne permet d'affirmer que les disparités seraient décomposées et traitées en composantes horizontale et verticale, plutôt que selon leurs coordonnées polaires.

### I.3.3 L'horoptère

Le terme originel d'horoptère, introduit par Franciscus Aguilonius en 1613, considérait la position des points équidistants des yeux de l'observateur. Cette définition mettait en évidence la non-linéarité entre l'espace physique (le cercle contenant les points sous-tendant un angle équivalent entre les deux yeux) et l'espace perceptif (le plan fronto-parallèle) (Shipley et Rawlings, 1970a). Par la suite, le critère de vision simple lié à la convergence est apparu avec l'horoptère circulaire défini mathématiquement par Vieth et Müller en 1826. L'horoptère mathématique, ou cercle de Vieth-Müller (Figure 12), est donc le

lieu géométrique liant convergence et disparité horizontale, c'est un cercle qui passe par le point de fixation et le point nodal de chaque œil. Cet horoptère théorique correspond au lieu des points de disparité nulle pour un point de fixation donné.

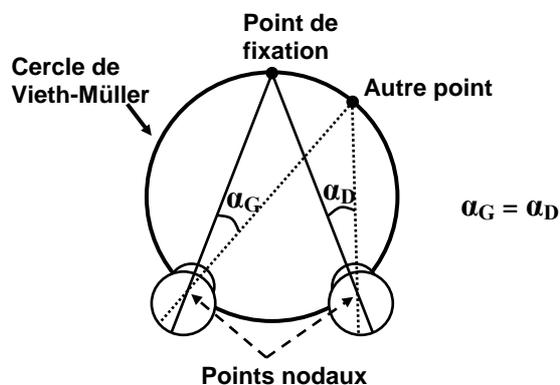


Figure 12 - Cercle de Vieth-Müller.

La forme de l'horoptère « expérimental » s'éloigne plus ou moins du cercle de Vieth-Müller selon le critère choisi : localisation égocentrique, plan fronto-parallèle apparent, stéréoaucuité maximale ou vision simple (Ogle, 1950; Tyler, 1983; Bourdy, 1989; Tyler, 1991). Par exemple, la mesure de plan fronto-parallèle apparent (Drobe *et al.*, 1997 ; Drobe et Monot, 1997) montre une forme plutôt incurvée que plane pour cet horoptère. La détermination du plan frontal apparent montre que l'espace visuel est perçu déformé autour d'une distance dite abathique : en avant, le plan frontal apparent est perçu concave, en arrière il est perçu convexe. La distance abathique correspondant à la distance où le plan frontal apparent se confond avec le plan frontal réel (Bourdy, 1957 ; Foley, 1978, 1991 ; Johnston, 1991). La déviation des horoptères empiriques par rapport à l'horoptère théorique est appelée déviation de Hering-Hillebrand (Ogle, 1950).

Le lieu tridimensionnel des points d'isodisparité horizontale nulle est un cylindre, c'est l'extension du cercle d'isodisparité de Vieth-Müller en haut et en bas dans le plan de regard.

Le lieu des points de disparité verticale nulle est le plan médian de la tête et le plan contenant l'horoptère horizontal. Pour un point de fixation donné, il existe un horoptère vertical théorique où les disparités horizontale et verticale sont nulles : il s'agit d'une ligne passant par le cercle de Vieth-Müller, dans le plan médian de la tête et perpendiculaire au plan de regard (Prévost, 1843, cité par Howard et Rogers, 1995). L'horoptère vertical empirique est une droite inclinée par rapport à la verticale passant par le point de fixation et un point situé au voisinage des pieds de l'observateur (Nakayama, 1983). La position de cet horoptère est liée à la posture de l'observateur.

### I.3.4 La disparité horizontale

#### I.3.4.1 Disparité horizontale d'ordre zéro

##### I.3.4.1.1 Disparité absolue/relative

Si les azimuts des images rétiniennes droite et gauche diffèrent, l'image d'un point va présenter une disparité horizontale. La disparité horizontale absolue est donc mesurée par la différence d'azimut du point dans les deux yeux :

$$\alpha = \alpha_G - \alpha_D$$

$\alpha_G$  et  $\alpha_D$  sont les angles horizontaux entre le point disparate et le point de fixation pour les yeux gauche et droit respectivement (Figure 13).

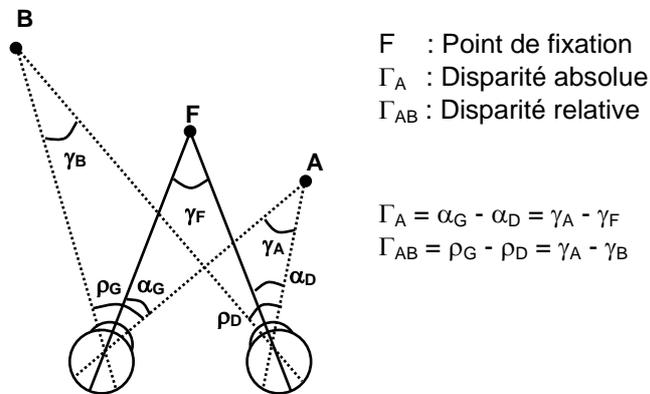


Figure 13 - Calcul de la disparité absolue et de la disparité relative.

On distingue la disparité absolue, ou disparité de point, et la disparité relative, ou disparité de taille. La disparité absolue correspond à une disparité d'ordre zéro, elle représente la différence entre le point de fixation et un point quelconque de l'espace. La disparité relative implique l'existence de deux points dans l'espace, différents du point de fixation, elle mesure une différence d'ordre zéro. Elle dépend de la séparation angulaire des images des deux points et n'est pas affectée par les mouvements oculaires (Howard et Rogers, 1995).

Considérant  $\gamma_F$  l'angle de convergence symétrique et  $\gamma_A$  un angle de convergence asymétrique (Figure 13), la disparité horizontale ( $\alpha_G - \alpha_D$ ) est liée à la variation de convergence binoculaire ( $\gamma_A - \gamma_F$ ) par la relation suivante :

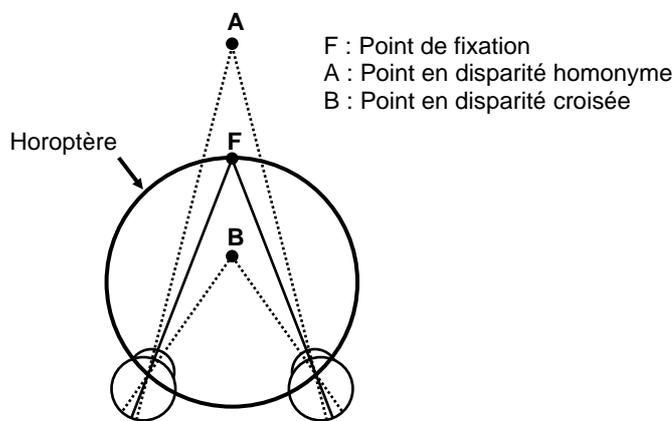
$$(\alpha_G - \alpha_D) = (\gamma_A - \gamma_F) = \frac{i \cdot d}{D^2} \text{ (radian)}$$

La convergence  $\gamma$  est inversement proportionnelle à la distance absolue du point fixé (D).  $i$  correspond à l'écart inter-pupillaire et  $d$  à la distance en profondeur entre A et F. La disparité horizontale est inversement proportionnelle au carré de la distance absolue D (Ritter, 1977). Les deux composantes de la vision binoculaire, disparité et convergence, sont liées géométriquement bien qu'elles soient de nature différente. L'indice de profondeur pourra donc

être traité par le système visuel, selon les cas, soit à partir de la disparité horizontale, soit à partir de la convergence.

### I.3.4.1.2 Disparité croisée/homonyme

Le lieu des points de disparité nulle, pour un point de fixation donné, est l'horoptère. Les disparités horizontales peuvent être séparées en deux types selon la position du point disparate par rapport à l'horoptère (Figure 14) : par convention, pour un point en avant de l'horoptère, la disparité horizontale est positive et couramment appelée croisée. Pour un point en arrière de l'horoptère, la disparité horizontale est négative ou homonyme / décroisée / non croisée (Collewijn *et al.*, 1991).



**Figure 14 - Représentation de la disparité croisée et de la disparité homonyme** : les points en avant de l'horoptère sont en disparité croisée (point B) et les points en arrière de l'horoptère sont en disparité homonyme.

Les disparités croisées ou homonymes présentent des caractéristiques différentes. L'optique géométrique permet de prédire la profondeur produite par des disparités horizontales. Le calcul montre qu'une même valeur absolue de disparité horizontale va produire une profondeur physique, par rapport au plan de fixation, plus grande pour les disparités homonymes que pour les disparités croisées (Ritter, 1977 ; Cormack and Fox, 1985) (cf. calculs en Annexe 2).

### I.3.4.2 Disparités horizontales d'ordre supérieur : les gradients de disparité

Le gradient de disparité de premier ordre décrit le changement de disparité selon l'angle visuel (Howard et Rogers, 1995). Il correspond à la différence de disparité entre deux points par unité d'angle de séparation ( $\varphi$ ) (Figure 15, (b)), en première approximation :

$$\text{Gradient de disparité} = \frac{(\alpha_{1G} - \alpha_{2G}) - (\alpha_{1D} - \alpha_{2D})}{(\alpha_{1D} - \alpha_{2D})} = \text{HSR} - 1$$

$\alpha_G$  et  $\alpha_D$  sont les angles horizontaux respectivement pour l'œil gauche et l'œil droit, les indices 1 et 2 correspondent aux deux points disparates considérés ; HSR est le rapport de taille horizontale (Horizontal Size Ratio).

Plus rigoureusement, la formule du gradient de disparité horizontale entre deux points est la suivante (Howard et Rogers, 2002) :

$$\frac{\Delta\alpha}{\Delta\varphi} = \frac{(\alpha_{1G} - \alpha_{2G}) - (\alpha_{1D} - \alpha_{2D})}{\left[ \frac{(\alpha_{1G} - \alpha_{1D}) - (\alpha_{2G} - \alpha_{2D})}{2} \right]}$$

$\Delta\varphi$  est la séparation horizontale moyenne entre les images.

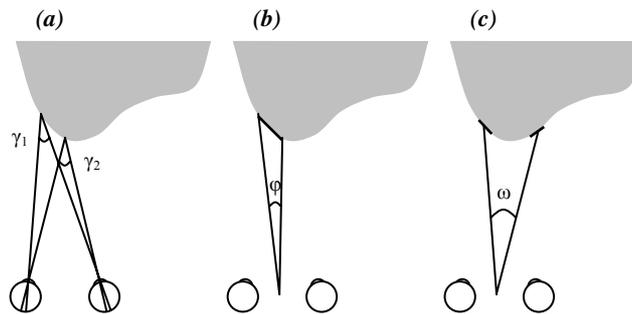


Figure 15 - disparité relative, gradient de disparité et disparité de courbure (d'après Rogers et Cagenello, 1989) :

- (a) la différence de disparité entre deux points est la différence entre leur convergence binoculaire ( $\gamma_1 - \gamma_2$ ).
- (b) Le gradient de disparité de deux points est la différence de disparité entre ces deux points divisée par leur séparation angulaire ( $\varphi$ )
- (c) La disparité de courbure, ou gradient d'ordre deux de disparité est la différence de gradient de disparité des deux surfaces élémentaires divisée par leur séparation ( $\omega$ )

Le grossissement horizontal de l'image d'un œil par rapport à l'autre produit un gradient de disparité horizontale dans la direction horizontale ( $\delta\alpha/\delta\varphi_h$ ), cette déformation produit l'effet, décrit plus loin, appelé « effet géométrique » (Howard et Rogers, 1995).

Si on considère que la différence de disparité entre deux points A et B est proportionnelle à l'inverse du carré de la distance absolue (D) du point fixé :  $\alpha_G - \alpha_D = \gamma_1 - \gamma_2 = k/D^2$ . Alors la variation de disparité par unité d'angle visuel, ou le gradient de disparité  $(\gamma_1 - \gamma_2)/\varphi$ , est proportionnel à  $1/D$ , car  $\varphi = k/D$  ( $\varphi$  est l'angle visuel). Le gradient de disparité entre deux points est donc une fonction linéaire inverse de leur distance le long d'une direction visuelle donnée (Rogers et Cagenello, 1989). En d'autres termes, si l'angle  $\varphi$  tend vers zéro, le gradient de disparité est la dérivée spatiale première de la différence de disparité entre deux points, et la dérivée première d'une fonction carrée est une fonction linéaire.

La disparité de courbure (Figure 15, (c)) est la différence de gradient de disparité de deux surfaces élémentaires divisées par leur séparation ( $\omega$ ), c'est-à-dire la dérivée spatiale seconde de la disparité. C'est la disparité de second ordre, elle est indépendante des changements de distance d'observation, pour des surfaces proches du plan médian de la tête

(si  $\omega$  tend vers zéro). La disparité de courbure reste approximativement constante avec la distance de fixation et donc fournit une information directe sur la courbure locale des surfaces dans le monde qui nous entoure (Rogers et Cagenello, 1989).

### I.3.5 La disparité verticale

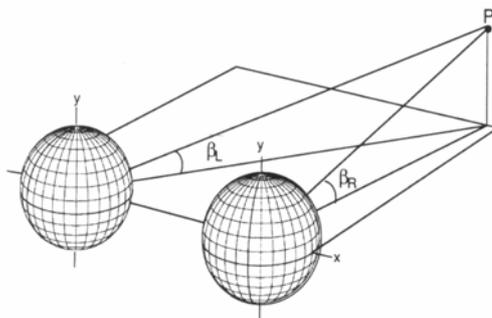
#### I.3.5.1 Disparité verticale d'ordre zéro

Les projections rétiniennes de la plupart des scènes visuelles contiennent des différences verticales. Les disparités verticales apparaissent quand un objet sous-tend un angle plus grand pour un œil que pour l'autre, parce qu'il est plus près d'un œil que de l'autre. En d'autres termes, la disparité verticale résulte d'un grossissement différentiel, ce qui se produit pour tous les points hors de l'axe vertical. Si un objet est placé à gauche du plan médian de la tête, l'image rétinienne sera plus grande pour l'œil gauche que pour l'œil droit. Dans les scènes naturelles, aucune disposition d'objets dans le plan médian ne produit de disparité verticale. Pour des yeux alignés verticalement, il ne peut y avoir de disparité verticale pour tous les points du plan médian de la tête et du plan horizontal passant par les deux yeux.

La disparité verticale absolue ( $\beta$ ) d'un point quelconque de l'espace est mesurée par la différence d'élévation de ce point dans les deux yeux :

$$\beta = \beta_G - \beta_D$$

$\beta_G$  et  $\beta_D$  sont les angles verticaux entre le point P et le plan horizontal pour les yeux gauche et droit respectivement (Figure 16).

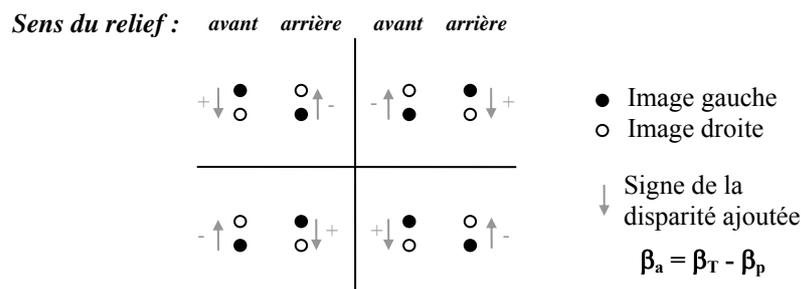


**Figure 16 - disparité verticale absolue :** les angles  $\beta_L$  et  $\beta_R$  correspondent aux angles d'élévation du point P pour l'œil gauche et pour l'œil droit, respectivement, dans un repère azimut longitudinal / élévation latitudinale.

Comme le montre la Figure 16, le point de fixation des yeux n'a pas d'importance, les disparités verticales dépendent de la position du système yeux-orbite, et non de l'orientation de l'œil dans l'orbite.

Rappelons que les disparités verticales d'une scène visuelle dépendent du système de coordonnées choisi pour les mesurer. En choisissant un système de coordonnées longitudinal pour l'azimut et latitudinal pour l'élévation, la mesure des disparités angulaires n'est pas affectée par les mouvements de vergence ou de version horizontaux (cf. § I.3.2).

Le sens du relief pour la disparité verticale dépend du quadrant, le champ visuel étant divisé en quatre quadrants autour du point de fixation (Matthews *et al.*, 2003), contrairement au sens du relief des disparités horizontales qui est le même sur tout le champ visuel. La Figure 17 permet de connaître le sens du relief par rapport au plan de fixation en fonction du signe de la disparité verticale ajoutée pour les quatre quadrants du champ visuel. La disparité ajoutée est la disparité que l'on va introduire à un stimulus par déplacement des pixels les uns par rapport aux autres, le stimulus sans disparité ajoutée correspond au plan de fixation. Il s'agit de la disparité totale ( $\beta_T$ ) à laquelle on soustrait la disparité ( $\beta_p$ ) du plan de fixation ( $\beta_a = \beta_T - \beta_p$ ).



**Figure 17 - Représentation schématique du décalage des images droite et gauche l'une par rapport à l'autre indiquant le signe de la disparité ajoutée au plan.** Selon le quadrant (le champ visuel étant divisé en quatre quadrants autour du point de fixation), le signe de la disparité définit un sens de relief vers l'avant ou vers l'arrière par rapport au plan (d'après Matthews *et al.*, 2003).

Par exemple, pour une disparité ajoutée positive ( $\beta_a > 0$  dans la Figure 17), le relief sera perçu en avant du plan de fixation dans les quadrants supérieur gauche et inférieur droit, mais sera perçu en arrière du plan de fixation pour les quadrants supérieur droit et inférieur gauche. Et inversement pour une disparité verticale ajoutée négative ( $\beta_a < 0$ , Figure 17).

Mayhew (1982, cité par Howard et Rogers, 2002) montre que la disparité verticale absolue ( $V$ ) d'un point dépend de sa distance absolue et de son excentricité, par la formule suivante :

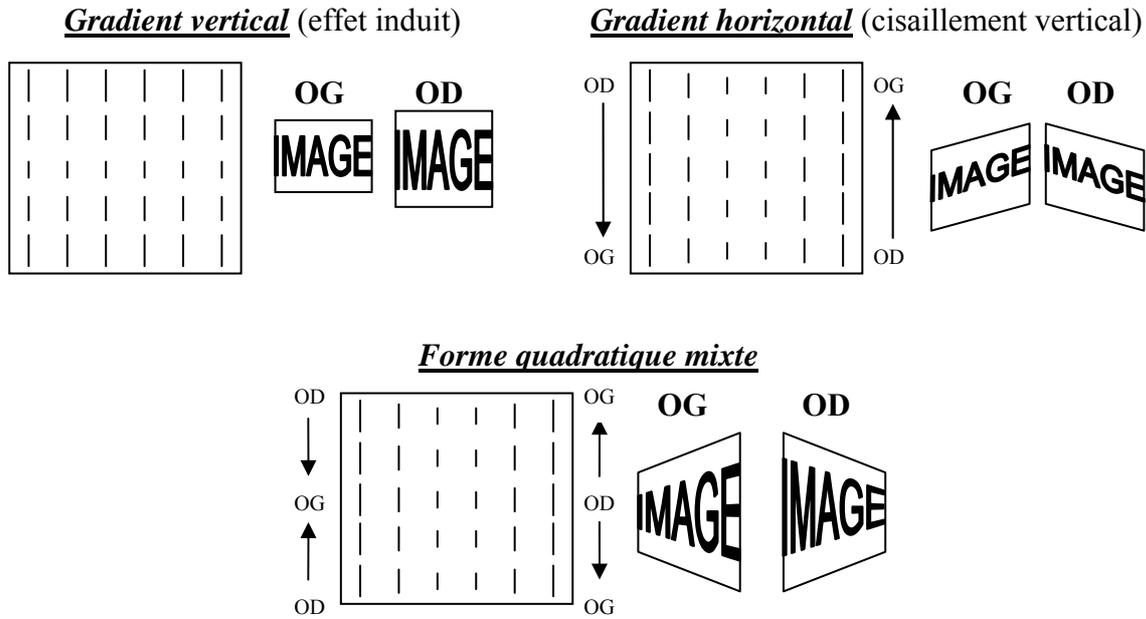
$$V = \frac{I.c.r}{d} + \frac{I.r.g}{d}$$

$I$  est l'écart pupillaire,  $c$  et  $r$  sont les excentricités respectivement horizontale et verticale,  $d$  est la distance de fixation et  $g$  l'angle de regard pour ce point. Cette formule n'est vraie que pour des yeux alignés en torsions et verticalement. Clement (1992) souligne, à propos de cette formule, que la contrainte torsionnelle est un frein pour l'analyse d'un modèle du système visuel.

### 1.3.5.2 Disparité verticale d'ordre supérieur

Les différents types de transformations de la disparité verticale (Figure 18) sont semblables à ceux rencontrés pour la disparité horizontale : le premier ordre est le gradient de disparité verticale, de direction horizontale ou verticale. Un grossissement vertical de l'image

d'un œil produit un gradient de disparité verticale dans la direction verticale ( $\delta\beta / \delta\phi_v$ ) (Howard et Rogers, 1995). Ce gradient vertical de disparité verticale a été étudié largement par l'effet perceptif qu'il produit, appelé « effet induit », depuis Ogle (1950). Le terme de cisaillement vertical, utilisé par Howard et Kaneko (1994), correspond à un gradient horizontal de la disparité verticale, par comparaison avec le cisaillement horizontal pour un gradient vertical de la disparité horizontale.



**Figure 18 - Représentation schématique des transformations d'ordre supérieur de la disparité verticale :** les gradients vertical (en haut, à gauche) et horizontal (en haut, à droite) ; un exemple de transformation de second ordre, la forme quadratique mixte (en bas). Pour chaque type de transformation, une représentation sous forme de segment reliant des points correspondants de l'image droite et de l'image gauche, à gauche, et une représentation de la déformation des images droite et gauche, à droite.

Le type de transformation de second ordre de la disparité verticale, utilisé par Rogers et Bradshaw (1995) puis par Berends et Erkelens (2001), est une forme quadratique mixte, c'est-à-dire un gradient vertical (transformation dépendant de l'élévation  $y$ ) de disparité verticale dépendant elle-même de l'azimut  $x$ , ou encore la combinaison d'un gradient vertical et d'un gradient horizontal de disparité verticale.

Les disparités binoculaires ayant été définies dans leur composante horizontale et dans leur composante verticale séparément, il s'agit à présent d'essayer de comprendre comment ces deux composantes sont traitées respectivement et l'une par rapport à l'autre en envisageant au préalable la perception de profondeur qu'elles produisent.

## **II Le traitement des disparités : la stéréopsie**

### **II.1 Caractérisation de la vision stéréoscopique**

#### **II.1.1 L'acuité stéréoscopique**

L'acuité stéréoscopique est définie par le seuil stéréoscopique qui est mesuré par la plus petite variation de profondeur que l'œil est capable de détecter. Plus le seuil stéréoscopique est faible et plus l'acuité stéréoscopique est élevée. Classiquement, la mesure du seuil de stéréoacuité est réalisée sur la base de la disparité relative entre deux points situés dans la zone de vision simple. Dans le meilleur des cas, une hyperacuité de 2 à 5 secondes d'arc est possible pour un observateur libre en convergence (McKee, 1983 ; Tyler, 1983). Différents paramètres peuvent influencer la précision de l'acuité stéréoscopique :

La stéréoacuité est liée à l'acuité visuelle monoculaire des deux yeux. Ainsi l'acuité stéréoscopique varie avec l'excentricité rétinienne, elle diminue très rapidement de la fovéa à la périphérie. En particulier, elle devient très faible en dehors du cercle passant par les deux taches aveugles du champ visuel. La dégradation de la perception du relief avec l'excentricité, en dehors de la fovéa, semble également être une fonction continue de la disparité verticale, elle commence à être détectable pour une disparité verticale de 10 minutes d'arc (Ogle, 1955). Par ailleurs, la distance à laquelle l'acuité stéréoscopique est testée n'influence pas sa mesure (Ogle, 1958a). De même, l'âge et le niveau d'accommodation ne semblent pas l'affecter, pourtant des variations inter-individuelles sont fréquentes.

La diminution de l'éclairement rétinien ou du contraste va réduire l'acuité stéréoscopique. Le seuil stéréoscopique est minimal et constant pour des forts niveaux d'éclairement, il augmente en condition scotopique mais la stéréoacuité reste relativement élevée (Mueller et Lloyd, 1948). Un seuil stéréoscopique de 5 secondes d'arc pour un niveau lumineux de  $10^2$  candela/m<sup>2</sup>, augmente à 30 secondes d'arc pour  $10^{-5}$  candela/m<sup>2</sup>. La dualité de la rétine, reposant sur les cônes et les bâtonnets, joue un rôle dans la stéréoacuité à des luminances différentes (photopique / scotopique). Une discrimination du relief semble possible pour des intensités plus faibles que la limite de sensibilité à la lumière des cônes. Les bâtonnets joueraient donc un rôle dans la perception du relief.

De plus, l'acuité stéréoscopique augmente avec le temps de présentation du test (entre 6 et 1000 ms). Entre 0,2 ms et 6 ms, l'acuité stéréoscopique présente un plateau. Une vision stéréoscopique est possible pour des durées très faibles (0,2 ms), la stéréopsie est donc possible en l'absence de mouvements oculaires (Ogle, 1958b). Cependant, la vision stéréoscopique a une période d'intégration temporelle relativement longue et variable selon les individus (Tam et Stelmach, 1998). Cette période d'intégration de la vision stéréoscopique est plus longue que pour les autres fonctions visuelles. La fusion est complète au bout de

30 ms (Woo, 1974). Dans la discrimination du relief induit par des disparités horizontales croisées ou homonymes (cf. § I.3.4.1.2), pour des temps de présentation brefs (< 200 msec), des individus peuvent être insensibles aux disparités croisées et/ou aux disparités homonymes, Richards (1971) parle alors de « stéréoanomalies ». Pour des temps de présentation plus longs, le système stéréoscopique semble sensible aux disparités croisées et homonymes (Patterson et Fox, 1984).

Enfin, les stimuli ou les tests utilisés peuvent influencer la mesure de la stéréoacuité. En particulier, des stimuli pour lesquels il y a une variation continue de la disparité (par exemple des surfaces ou lignes inclinées) sont connus pour être des cibles pauvres pour l'acuité stéréoscopique (McKee, 1983). Les stimuli sont appelés des stéréogrammes, c'est-à-dire des images planes de disparité connue qui induise une perception binoculaire de relief. Les stéréogrammes sont linéaires, donnant une perception qualitative du relief, ou de points aléatoires, donnant une perception quantitative du relief.

### II.1.2 Les stéréogrammes cyclopéens

Les images cyclopéennes, introduites en 1960 par Julesz sont des formes visibles seulement après fusion des images monoculaires, les indices monoculaires de relief n'intervenant pas (Julesz, 1971). Ils sont constitués de textures (points, lignes, etc.) répartis aléatoirement ; dans le cas des stéréogrammes à points aléatoires ou *random-dot stereograms* (RDS), il s'agit de points. Howard et Rogers, (1995), à partir des travaux de Ninio (1981), précisent que, dans les RDS standards, une grande discontinuité de disparité produite par le déplacement d'une région de points pour un œil, peut entraîner une zone d'occultation monoculaire pour un seul œil. Cette zone de l'image visible pour un œil mais pas pour l'autre est un indice « binoculaire » qui joue un rôle important dans la perception du relief (Cutting et Vishton, 1995). Bien qu'étant des stéréogrammes cyclopéens, les RDS peuvent donc présenter des indices dits picturaux, c'est le cas de la zone d'occultation monoculaire. Cette dernière n'existe pas pour des stéréogrammes cyclopéens générés par des modulations continues de la disparité.

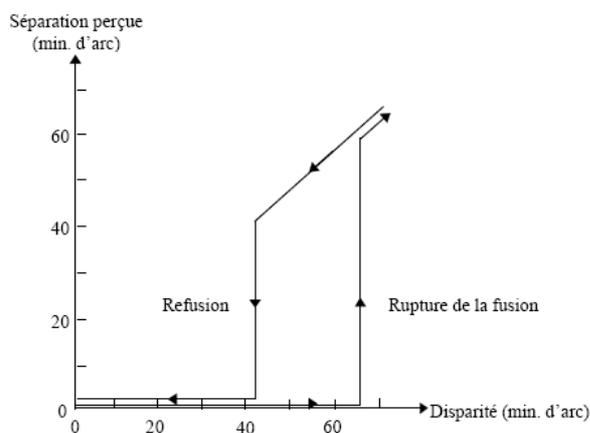
Les images cyclopéennes sont traitées globalement (la notion de traitement global ou local sera expliquée dans le paragraphe II.1.4), l'environnement global devant être pris en compte pour lever l'ambiguïté des appariements binoculaires (Julesz, 1971). Les RDS indiquent que la vision stéréoscopique est un processus précoce dans le traitement de l'information visuelle, indépendant de l'opération perceptive et cognitive subséquente. Elle provient d'abord d'une opération d'appariement (Buser et Imbert, 1987). La stéréopsie globale nécessite en premier lieu de détecter la corrélation binoculaire. La sensibilité à la corrélation et la décorrélation de RDS a été étudiée, la corrélation étant définie comme la proportion d'éléments du RDS qui correspondent dans les deux images droite et gauche, et la décorrélation la proportion d'éléments qui sont appariés aléatoirement : la tolérance à la

corrélation peut atteindre environ 50 % de décorrélation (Gantz *et al.*, 2007). Cette sensibilité à la corrélation binoculaire dépend des modulations spatiales et temporelles de la disparité (Lankheet et Lennie, 1996). Les mécanismes impliqués dans la tâche apparemment globale de la détection de la corrélation binoculaire reflèteraient un traitement purement local de l'information de disparité (Tyler, 1975).

Notons que dans l'étude des disparités binoculaires comme indice de relief, l'utilisation de stéréogrammes cyclopéens, avec une variation continue de la disparité, est particulièrement adaptée pour minimiser les indices monoculaires de relief.

### II.1.3 Le phénomène d'hystérésis stéréoscopique

Fender et Julesz (1967) ont mis en évidence l'existence d'un phénomène d'hystérésis stéréoscopique, c'est-à-dire le décalage entre la cause et l'effet dans la fusion sensorielle : la disparité moyenne d'un stéréogramme à points aléatoires peut augmenter de 2° avant que la perception stéréoscopique soit détruite, et une fois perdue il faut diminuer la disparité à 10 minutes d'arc pour réactiver la stéréopsie (Figure 19). L'hystérésis s'explique par un mécanisme de rivalité qui, quand la stéréopsie est détruite, interdit le processus stéréoscopique jusqu'à ce que la disparité soit assez faible pour tomber dans la zone de fusion, où le relief est à nouveau perçu. La « refusion » peut néanmoins se produire en dehors des limites des aires fusionnelles de Panum (Piantanida, 1986).



**Figure 19 - Hystérésis de la fusion sensorielle pour des stéréogrammes à points aléatoires** (d'après Fender et Julesz, 1967) : la rupture de la perception stéréoscopique se produit pour une valeur de disparité supérieure à celle qui permet la refusion.

Dans les méthodes psychophysiques de présentation ordonnée du stimulus, telles que la méthode d'ajustement ou la méthode des limites, le phénomène d'hystérésis est fréquemment observé entre les séries ascendantes et les séries descendantes.

## II.1.4 La stéréopsie globale / locale

La stéréopsie globale est mise en évidence avec des images cyclopéennes telles que les random dot stereograms (Julesz, 1971), la stéréopsie locale uniquement avec quelques points (stéréogramme linéaire).

La stéréopsie globale va sélectionner parmi un ensemble de combinaisons possibles celle qui fournira la perception de la forme tridimensionnelle. Les figures continues constituent un puissant signal d'entrée pour un mécanisme de fusion « globale » qui moyennerait les disparités des différents éléments pour obtenir une valeur de relief simple de la figure entière (McKee, 1983). Le processus de la fusion fait que les grandes différences de disparité pourront être perçues comme des contours continus.

La stéréopsie locale va traiter la disparité d'une région du champ visuel sans tenir compte des disparités présentes dans les autres régions. Elle peut être patente : pour des disparités supérieures aux limites de la fusion – représentées par les aires de Panum –, une perception de profondeur locale est possible (Julesz, 1971 ; Tyler, 1983 ; Buser et Imbert, 1987).

A l'opposé, selon Richards et Kaye (1974), il n'y aurait pas d'évidence pour que la stéréopsie utilise deux modes de traitement, local et global, séparés. Leurs définitions des stéréopsies globale et locale, testées avec un stéréogramme linéaire, ou de forme, sont les suivantes : la stéréopsie locale traiterait les disparités inférieures à  $\pm 1/2^\circ$  et la stéréopsie globale les disparités supérieures à  $\pm 1/2^\circ$ . Cette dissociation selon la taille des disparités a également été mise en évidence dans la perception observée pour des stéréogrammes cyclopéens, on parle de stéréopsie fine / stéréopsie grossière (Tyler, 1983 ; 1991). Un random-dot stéréogramme avec deux groupes de points superposés, de disparités distinctes peut produire une des trois impressions suivantes :

- Une disparité moyenne, la figure est perçue dans un plan à une profondeur intermédiaire.
- Du relief en « dentelle », la perception d'une figure de points flous à différentes profondeurs. On parle de *pyknostéréopsie*. C'est le cas des faibles disparités qui sont fusionnées pour former un seul plan dense.
- Du relief transparent, une surface est vue à travers l'autre : la *diastéréopsie*. Elle se produit pour des grandes disparités, elle est équivalente, en 3D, à la diplopie latérale (la vision dédoublée latéralement).

Le moyennage des disparités apparaîtrait pour une disparité supérieure à 2 minutes d'arc (Howard et Rogers, 2002). Cependant, on ne sait pas vraiment si ce traitement se produit avant ou après la combinaison des images binoculaires.

## II.1.5 La stéréopsie en vision périphérique

La mesure traditionnelle de l'acuité stéréoscopique, et particulièrement dans la pratique clinique, s'intéresse essentiellement à la vision stéréoscopique fovéale ou parafovéale. De même, la plupart des études s'intéressent à la vision stéréoscopique centrale et peu à la vision stéréoscopique périphérique. On différencie une région centrale, contenant la fovéa et la zone parafovéale, et dont la limite correspond à environ  $7^\circ$  d'excentricité rétinienne, et une région périphérique au-delà de  $7^\circ$  d'excentricité rétinienne.

La rétine périphérique est essentiellement constituée de bâtonnets (125 millions). Très sensibles à la lumière, ils ont besoin de peu de lumière pour délivrer des informations, relatives à la perception des mouvements, à la vision dans la pénombre. Cette zone périphérique joue un rôle important pour l'homme dans l'appréciation de son environnement (alarme, déplacement...).

Le champ visuel total de l'homme couvre  $170$  à  $190^\circ$  dans le méridien horizontal, dont les  $120^\circ$  centraux sont vus binoculairement. Dans le méridien vertical, le champ visuel monoculaire et binoculaire représente  $130^\circ$  d'angle visuel. La stéréopsie couvre le champ visuel binoculaire complet, elle n'est pas réduite à la région autour du point de fixation. La profondeur stéréoscopique peut être perçue au-delà de  $30^\circ$  d'excentricité dans les deux directions, horizontale et verticale, mais les caractéristiques en dehors de la région périfovéale ont été moins étudiées (Ogle, 1950 ; Tyler, 1991). La majorité des études de perception stéréoscopique en périphérie rétinienne a porté sur la perception de plans fronto-parallèles et la position de l'horoptère selon le critère de mesure choisi (disparité binoculaire nulle, distance perçue par rapport à l'observateur égale, vision simple...).

Les études réalisées en champ visuel périphérique indiquent que la sensibilité aux disparités permettant de percevoir un plan fronto-parallèle diminue avec l'augmentation de l'angle visuel périphérique, et avec la diminution de la distance d'observation (Ogle, 1950). La chute de sensibilité en périphérie s'explique par la diminution de la résolution spatiale de la fovéa vers la périphérie de la rétine. L'acuité stéréoscopique mesurée par la sensibilité aux disparités horizontales est maximale au centre de la fovéa, elle chute avec l'excentricité et en particulier au-delà de  $6^\circ$  (Rawlings et Shipley, 1969). En vision périphérique, des modulations sinusoïdales de la disparité ont également été étudiées en fonction de la fréquence de corrugation, jusqu'à  $21^\circ$  d'excentricité (Prince et Rogers, 1998) : la sensibilité à la modulation de disparité diminue avec l'augmentation de l'excentricité, pouvant s'expliquer par le facteur de magnification corticale. D'autre part, la disparité verticale limite, au-delà de laquelle il n'y a plus de stéréopsie n'augmente pas avec l'excentricité dans le champ visuel pour des mesures effectuées jusqu'à  $6^\circ$  d'excentricité (Ogle, 1955).

Les disparités verticales, en particulier leur influence sur la perception des formes 3D, ont été étudiées en fonction de la taille du champ visuel (Cumming *et al.*, 1991 ; Rogers et

Bradshaw, 1993 ; Howard et Kaneko, 1994). Nous verrons par la suite (cf. § II.4), que les disparités verticales ne donnent pas le même type d'information quand elles sont présentes en champ visuel central ou en périphérie.

## II.2 Relation entre la perception des formes et la distribution des disparités binoculaires

Tous les objets naturels comportent des disparités horizontales et des disparités verticales, même pour l'objet le plus simple. La seule exception serait un objet qui aurait la forme de l'horoptère théorique horizontal et/ou vertical.

### II.2.1 Le plan fronto-parallèle

Si on considère que les deux yeux convergent symétriquement sur un point, un plan fronto-parallèle va présenter des disparités horizontales et verticales. La répartition des différentes disparités pour un point de fixation central est donnée par la Figure 20.

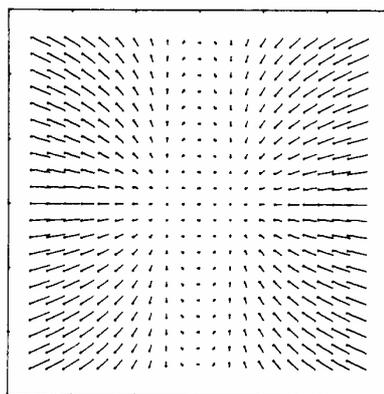


Figure 20 - Représentation de la composition des disparités horizontales et verticales, sous forme vectorielle, d'un plan fronto-parallèle (Nakayama, 1983).

En convergence symétrique, les disparités horizontales et verticales d'un plan fronto-parallèle sont réparties de la façon suivante : pour un angle de vergence donné, la disparité verticale est proportionnelle à l'excentricité horizontale avec une dépendance secondaire sur l'excentricité verticale ; la disparité horizontale n'est proportionnelle qu'à l'excentricité horizontale. Tous les points du plan médian de la tête ont une disparité nulle (cf. horoptère vertical théorique).

Pour juger si une surface est fronto-parallèle, l'efficacité (défini dans le § I.2.1) de l'indice de disparité verticale augmente avec l'augmentation de la taille du stimulus (Rogers et Bradshaw, 1995) : dans l'estimation de la profondeur d'un stimulus de 10° de diamètre, l'indice de disparité verticale n'intervient pas.

Notons que, malgré ces disparités horizontales et verticales, quand on lit une feuille présentée dans le plan fronto-parallèle, on ne la perçoit pas dédoublée. Le plan fronto-

parallèle objectif, différent du cercle de Vieth-Müller, présente des disparités binoculaires. Ces disparités sont inférieures à la taille des aires fusionnelles de Panum, ce qui permet de les fusionner et de ne pas voir la feuille double. De plus, les mesures expérimentales de plan fronto-parallèle apparent donnent une forme concave comprise entre le cercle de Vieth-Müller et le plan fronto-parallèle réel. Un stimulus présenté dans un plan fronto-parallèle pourra ainsi être perçu légèrement convexe en avant de la distance abathique et légèrement concave en arrière (cf. § I.3.3).

## **II.2.2 L'inclinaison et l'obliquité d'une surface**

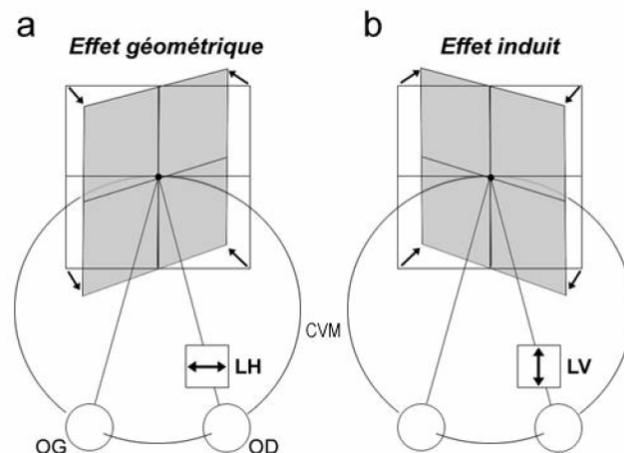
L'inclinaison d'une surface représente la rotation de la surface autour d'un axe horizontal, et l'obliquité d'une surface la rotation autour d'un axe vertical. Une surface oblique crée une « rampe » de disparités horizontales sur toute la surface, une disparité dite de compression-expansion ou un gradient horizontal de disparité horizontale. Une surface inclinée crée un gradient vertical de disparité horizontale ou cisaillement horizontal. Ces gradients horizontaux et verticaux constituent le premier ordre des transformations de la disparité horizontale (Howard et Rogers, 1995).

Un cisaillement horizontal (donnant une inclinaison) est plus facilement détectable qu'une disparité de compression-expansion (donnant une obliquité) (Rogers et Graham, 1983). Cette anisotropie s'expliquerait par l'utilisation par le système visuel des disparités d'orientation (Cagenello et Rogers, 1993). Cependant, les variations continues de la disparité comme les gradients horizontaux, appliquées sur tout le stimulus, sont difficilement perçues en profondeur, un gradient de disparité est plus difficilement détectable que des disparités discontinues (McKee, 1983). Par exemple, la profondeur dans un RDS représentant une surface inclinée ou oblique en profondeur est plus longue à percevoir que la profondeur dans un RDS représentant deux surfaces adjacentes tournées ou inclinées dans des directions opposées (Gillam *et al.*, 1988b).

Pour la perception d'inclinaison d'une surface, par rapport à un axe horizontal, une disparité de cisaillement vertical (gradient horizontal de disparité verticale) produit à peu près le même degré d'inclinaison que la même disparité de cisaillement horizontal (gradient vertical de disparité horizontale). La perception d'une inclinaison pour une grande texture dépend de la différence entre les disparités de cisaillement horizontal et de cisaillement vertical (gradient vertical de disparité horizontale et gradient horizontal de disparité verticale, respectivement). Des disparités horizontales et verticales de directions opposées produisent une inclinaison apparente plus importante que celle produite par des disparités horizontales seules (Howard et Kaneko, 1994). L'inclinaison d'une surface, définie stéréoscopiquement, est déterminée de façon non ambiguë par quatre signaux, combinés à la disparité horizontale, que sont : la vergence et la version des yeux, le rapport de taille vertical (VSR) et le gradient

horizontal de disparité verticale. Avec l'augmentation de la taille du stimulus, la disparité verticale semble avoir plus de poids que la position des yeux (Backus *et al.*, 1999).

La perception d'obliquité d'une surface ou de rotation d'une surface par rapport à un axe vertical peut être produite par des disparités horizontales seules, selon un gradient horizontal, on parle d'*effet géométrique* (Figure 20a). Parallèlement, la perception d'une surface oblique peut être produite uniquement par des disparités verticales, distribuées en gradient vertical, étudiées sous le nom d'*effet induit* (Gillam et Lawergren, 1983). L'effet induit est le résultat du grossissement vertical d'une image rétinienne (par un verre), il donne une rotation du plan frontal autour d'un axe vertical (Figure 20b) (Ogle, 1950).



**Figure 21 - Représentation de la perception de rotation d'une surface par rapport à l'axe vertical :**  
**(a)** l'*effet géométrique* correspond au grossissement horizontal, par une lentille (LH), de l'image de l'œil droit par rapport à celle de l'œil gauche, la surface plane fronto-parallèle apparaît tourner vers l'œil qui porte la lentille ; **(b)** l'*effet induit* correspond au grossissement vertical, par une lentille (LV), de l'image de l'œil droit par rapport à celle de l'œil gauche, la surface plane fronto-parallèle apparaît tourner vers l'œil sans lentille.

Une région de disparité verticale produit peu ou pas de rotation par rapport à un axe vertical (effet induit) quand elle présente un pourtour de disparité nulle (Howard et Rogers, 1995). La disparité verticale de la région centrale serait moyennée avec la disparité verticale nulle du pourtour. Un gradient de disparité verticale ne fournit aucune information significative sur la profondeur locale ou la rotation, et donc le fait de percevoir une surface selon sa véritable orientation ne repose pas sur le gradient de disparité verticale. En effet, les disparités verticales seraient moyennées sur une certaine surface (de moins de 20° environ) pour donner une disparité verticale (de taille) globale sur cette surface. Ce traitement global (cf. § II.5) serait utilisé pour mesurer les disparités horizontales dans la perception de plan orienté (Kaneko et Howard, 1997).

D'autre part, la perception de l'effet induit produit un inconfort pour l'observateur. La disparité verticale, sur tout le champ, indiquerait l'excentricité, et, au niveau du point de fixation, elle indiquerait une direction de regard de côté. Ainsi, l'inconfort produit par l'effet

induit s'explique par le fait qu'il y a un conflit entre les indices oculomoteurs et la direction de fixation des yeux (Gillam *et al.*, 1988a).

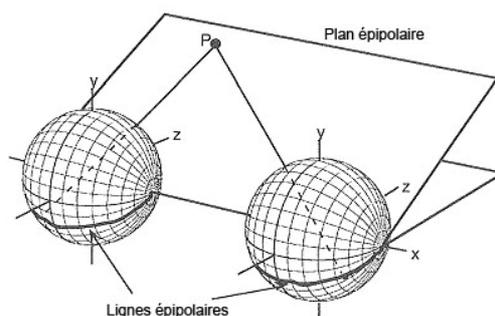
### **II.2.3 Les courbures**

Rogers et Cagenello (1989) ont observé que le système visuel est plus précis et plus sensible aux surfaces courbes (disparité de courbure) qu'aux surfaces inclinées (gradient de disparité). Le système visuel peut extraire l'information sur la forme des surfaces en utilisant la dérivée seconde de disparité, restant invariante avec la distance de fixation (cf. § I.3.4.2).

Des variations sinusoïdales de la disparité, produisant une corrugation de disparité et permettant d'étudier la sensibilité aux disparités en fonction de la modulation de fréquence, ont été étudiées. La mesure des seuils de discrimination de corrugation de disparité en fonction de la fréquence de corrugation montre que la fonction de modulation de disparité est passe-bande, c'est-à-dire qu'il existe une fréquence de corrugation optimale, pour chaque excentricité (Prince et Rogers, 1998). Une relative insensibilité aux corrugations verticales, uniquement pour les faibles fréquences spatiales, serait observée, mettant ainsi en évidence une anisotropie stéréoscopique (Bradshaw et Rogers, 1999).

### **II.2.4 La contrainte épipolaire**

L'extraction de l'information de disparité à partir de deux images, droite et gauche, nécessite avant tout l'identification du même point objet dans les deux images, c'est le problème de la correspondance dans la stéréopsie. Les expériences de Julesz (1971) avec les stéréogrammes à points aléatoires montrent que le système visuel résout ce problème même en présence de nombreuses fausses combinaisons et sans indices monoculaires. La simplification communément faite pour résoudre le problème de la correspondance est basée sur la contrainte épipolaire ou la simplification à une dimension : la correspondance d'un point d'une image va se faire sur une ligne dite épipolaire de l'autre image. Le plan épipolaire contient le point « disparate » et les points nodaux des deux yeux, il coupe les deux rétines en une paire de lignes épipolaires (Figure 22). Pour des yeux alignés en torsion et verticalement, tous les points correspondants sont dans un même plan épipolaire, et ont donc même élévation (Nielsen et Poggio, 1984 ; Howard et Rogers, 2002).



**Figure 22 - Plan épipolaire et lignes épipolaires :** le plan épipolaire passe par le point P de la scène visuelle et par les points nodaux des deux yeux. Le plan épipolaire coupe les deux rétines en deux lignes épipolaires. A l'image d'un point P pour un œil correspond une ligne épipolaire pour l'autre œil. Dans un repère azimut-latitudinal / élévation-longitudinale, les points correspondants ont même élévation (d'après Howard et Rogers, 2002).

La position et l'orientation des lignes épipolaires dépendent de la géométrie des yeux, par exemple de l'angle de version des yeux (Gårding *et al.*, 1995) : les lignes épipolaires correspondant à chaque position d'une rétine sont horizontales, sur l'autre rétine, pour une convergence symétrique, mais elles peuvent ne plus l'être pour des yeux fixant un point excentrique.

Dans un repère azimut latitudinal / élévation longitudinale, pour des yeux alignés en torsion et verticalement, et fixant un point à l'infini (les axes visuels étant parallèles), tous les points présents dans une scène visuelle naturelle ont une composante verticale nulle, les images rétiniennes droite et gauche de chacun d'entre eux étant sur des lignes épipolaires. Cependant l'utilisation habituelle du repère azimut longitudinal / élévation latitudinale et les conditions naturelles de fixation indiqueront une composante verticale non nulle, comme c'est le cas pour le plan fronto-parallèle. La contrainte épipolaire sert donc à résoudre les problèmes de correspondance, considérant un état de convergence symétrique des yeux et le repère azimut latitudinal / élévation longitudinale pour chaque œil avec un axe horizontal x frontal traversant les deux yeux.

## II.2.5 Le contraste de profondeur

Le contraste de profondeur est une adaptation perceptuelle qui entraîne la modification de la perception de profondeur d'une surface au voisinage d'une surface de disparité différente. Des effets de *contraste simultané* de perception de profondeur peuvent être mis en évidence par la présence d'un gradient de disparité, donnant une perception d'inclinaison, dans des régions encadrant une zone sans disparité, donc dans le plan frontal : la région sans disparité sera perçue inclinée. L'inclinaison induite peut être mesurée par une méthode d'annulation consistant en l'introduction progressive d'un gradient de disparité jusqu'à ce que la zone centrale soit perçue comme fronto-parallèle. Ce contraste simultané suggérerait l'existence d'un système d'inhibition latérale au niveau des contours en profondeur,

semblable à la perception de bords des organisations en centre-pourtour (Graham et Rogers, 1982).

L'illusion de Graik-O'Brien-Cornsweet, illustrant à l'origine un contraste de luminance, peut également être reproduite pour illustrer le contraste de profondeur avec un stéréogramme à points aléatoires (Rogers et Graham, 1983) : deux surfaces équidistantes de l'observateur ne sont pas perçues comme tel si elles sont reliées par une zone présentant un gradient de disparité (une surface inclinée ou orientée) dont les jonctions avec chacune des surfaces sont plutôt saillantes. Les deux surfaces latérales sont perçues équidistantes quand elles présentent une différence de disparité de 40 %. L'effet est plus important quand les surfaces sont séparées par une bande de discontinuité verticale produisant une disparité d'expansion-compression horizontale.

## **II.3 Perception de la profondeur et disparités**

### **II.3.1 Le plan de référence**

La profondeur est jugée par rapport à un plan de référence (Mitchison et McKee, 1990). L'absence de plan de référence rend la perception de profondeur plus difficile, expliquant la faible sensibilité aux gradients de disparité horizontale (McKee, 1983). Néanmoins, la présence d'un plan de référence peut donner une perception erronée de la profondeur réelle : des points sur des plans parallèles (selon l'axe des z) à un plan de référence défini localement seraient perçus comme fronto-parallèles (Glennerster et McKee, 1999). Cet effet diminue quand les points s'éloignent du plan de référence. Dans d'autres cas, le jugement de profondeur relative de deux lignes est considérablement amélioré avec une surface de référence de profondeur égale ou proche d'une des deux lignes (Andrews *et al.*, 2001).

Par conséquent, la sensibilité du système stéréoscopique humain est déterminée par la disparité des points par rapport à un plan de référence local. Ce plan de référence local n'est pas nécessairement le plan de fixation, il peut être incliné ou orienté, et même être défini par des points éloignés (Glennerster *et al.*, 2002 ; Petrov et Glennerster, 2004; Glennerster et McKee, 2004). L'avantage de ce traitement peut être qu'il évite de reconstruire un espace complexe 3D, en coordonnées centrées sur les yeux ou sur la tête, pour chaque mouvement des yeux ou de la tête.

Par ailleurs, la surface de référence pour le traitement des disparités peut être la surface du stimulus, quand celle-ci présente un indice de texture (Van den Enden et Spekreijse, 1989). Dans ce cas, ce n'est plus réellement le plan de profondeur de la surface qui sert de référence, mais la perception qui en est produite par l'indice monoculaire de texture. Il ne s'agit plus de stimuli cyclopéens, et un exemple montre que la permutation des

images de l'œil droite et de l'œil gauche rend difficile le renversement du relief, pouvant être attribué à la familiarité de la forme des objets et à la présence d'indices monoculaires de relief. Ce renversement du relief est pourtant possible si l'indice de perspective de la texture est neutralisé.

## **II.4 L'interaction entre les disparités horizontales et verticales**

La disparité verticale ne donnerait pas une augmentation de la perception du relief directement, mais la présence de disparités verticales en un point va dégrader la perception du relief due aux disparités horizontales en ce point (Hering, 1864, cité par Tyler, 1991 ; Ogle, 1955). Pour un stimulus avec une disparité de  $1^\circ$ , l'interaction de la disparité verticale avec la disparité horizontale dans la perception de la profondeur montre que la disparité verticale ne produit généralement pas de relief (Friedman *et al.*, 1978). De plus, l'atténuation du relief causée par un déplacement vertical du stimulus semble réduire autour de zéro le relief perçu pour une disparité horizontale seule. Cette atténuation serait proportionnelle à l'augmentation de la disparité verticale. Mais la disparité verticale peut également apporter une amélioration dans la perception tridimensionnelle. En effet, la disparité verticale serait utilisée pour estimer la disparité horizontale à de petites excentricités et des distances proches, ou pour estimer la réponse d'inclinaison produite par une disparité horizontale (Gillam *et al.*, 1988a). Pour explication, quand la disparité verticale est éliminée, la réponse quantitative à une disparité horizontale est pauvre.

Les études sur la disparité verticale se sont ensuite intéressées à leur impact sur la disparité horizontale en fonction de la taille du champ visuel présentant des disparités. Pour Cumming *et al.* (1991), les modifications de la disparité verticale n'ont pas d'effet sur la perception des formes tridimensionnelles, et les disparités verticales ne permettent pas d'estimer la distance de fixation, qui est utilisée pour évaluer les disparités horizontales, sur des surfaces de  $8-11^\circ$  de champ visuel. Par contre, pour des présentations couvrant un champ visuel plus large ( $70-80^\circ$ ), les disparités verticales donnent une estimation de la distance absolue utilisée pour mesurer les disparités (Rogers et Bradshaw, 1993). L'information de ces disparités verticales semble être extraite globalement. Par ailleurs, en présence d'un large pourtour dans lequel la disparité verticale est nulle, la disparité verticale centrale n'est pas utilisée localement pour évaluer la disparité horizontale (Howard et Kaneko, 1994). Ces résultats montrent que les disparités verticales jouent un rôle plus important, dans la perception tridimensionnelle par les disparités horizontales, en périphérie du champ visuel binoculaire.

D'autre part, une méthode d'annulation de la disparité verticale par la disparité horizontale a été étudiée pour trois types de disparité verticale (gradient vertical, cisaillement et forme quadratique mixte : cf. Figure 18) (Berends et Erkelens, 2001). Le rapport entre

disparité horizontale et verticale qui évoque la perception d'un stimulus fronto-parallèle varie avec le type de disparité verticale, de plus il existe un conflit entre la disparité verticale et les signaux oculomoteurs.

Finalement, les manipulations de la disparité verticale peuvent produire des effets locaux sur la profondeur, alors que l'inverse n'est pas vrai : la disparité verticale est insensible aux variations de profondeur locales (Bishop, 1996). Les disparités horizontales et verticales peuvent s'ajouter ou s'annuler localement selon leur signe. Ces résultats s'appuient sur une théorie physiologique basée sur les champs récepteurs bidimensionnels des cellules du cortex visuel (Matthews *et al.*, 2003). L'impression de relief par la disparité verticale seule n'est pas évidente, cependant elle peut être quantifiée, le système visuel ne tolère pas si facilement une petite quantité de disparité verticale (Ito, 2005). Ces dernières études suggèrent que les disparités verticales sont mesurées localement par le système visuel et elles s'ajoutent aux disparités horizontales.

#### II.4.1 L'interaction entre la disparité et la convergence

Lorsqu'un observateur fixe un point de l'espace, les deux yeux convergent vers ce point. La convergence binoculaire est mesurée par l'angle que font les deux axes de regard. On distingue deux types de convergence : une *convergence symétrique* ( $\gamma_F$ ) quand le point de fixation se trouve dans le plan médian, et une *convergence asymétrique* ( $\gamma_A$ ) quand il est en dehors du plan médian (cf. Figure 13). La convergence est proportionnelle à la distance absolue de l'objet fixé. La disparité horizontale ( $\alpha_G - \alpha_D$ ) est liée à la variation de convergence binoculaire ( $\gamma_A - \gamma_F$ ) par la relation suivante :

$$(\alpha_G - \alpha_D) = (\gamma_A - \gamma_F) = \frac{i \cdot d}{D^2} \text{ (cf. § I.3.4.1.1)}$$

L'effort musculaire lié soit au maintien de la convergence pour une fixation donnée, soit au changement de convergence lorsque la fixation passe d'un point à un autre, peut être utilisé comme indice « oculomoteur » dans la perception de la profondeur et du relief.

Le mécanisme de convergence binoculaire est la résultante de quatre composantes que sont la vergence tonique, la vergence accommodative, la vergence proximale et la vergence fusionnelle, ou de disparité. La composante de vergence de disparité, ou convergence fusionnelle, est déclenchée par la présence de disparités qu'elle tend à réduire, provoquant ainsi la fusion.

D'autre part, la distance du point de fixation est spécifiée par l'angle de vergence des axes visuels. La connaissance de la position des yeux dans leur orbite suffit donc à localiser le point fixé dans l'espace égocentré. Les autres éléments de la scène peuvent également être localisés soit en déplaçant le regard vers eux par modification de la convergence, soit par les disparités binoculaires qui les positionnent par rapport au point fixé. Les disparités

binoculaires et la position des yeux dans leur orbite (par la convergence) permettent donc de reconstruire l'espace visuel (Gårding *et al.*, 1995).

Enfin, lorsque l'on tourne le globe oculaire, l'image perçue d'un point ne tourne pas, alors que l'image rétinienne du point tourne sur la rétine. Cette stabilisation perceptive peut s'expliquer par l'utilisation de la *décharge corollaire* : la commande motrice est accompagnée d'une copie (appelée copie efférente ou décharge corollaire) utilisée par le système perceptif pour anticiper le résultat de l'action, permettant ainsi de stabiliser le monde perçu en modifiant l'information sensorielle en fonction de l'action en cours (Berthoz, 1997). Les décharges corollaires peuvent exister même en l'absence de tout mouvement. En effet, les forces internes (contractions des muscles extra-oculaires) nécessaires pour maintenir la fixation sur un point sont aussi accompagnées de décharges corollaires qui peuvent contribuer à la mesure de ces forces, de stabilisation de la convergence. La décharge corollaire des muscles extra-oculaires donne une information sur l'angle de vergence des yeux, permettant d'évaluer la distance égocentrique (Bishop, 1994).

## **II.5 Le traitement de la disparité binoculaire**

La décomposition des disparités binoculaires en leurs composantes horizontale et verticale a permis de mettre en évidence un traitement plutôt local des disparités horizontales et un traitement plutôt global des disparités verticales. De plus, chaque disparité horizontale serait évaluée par rapport à la disparité verticale moyenne sur tout le champ (Howard et Kaneko, 1994).

La composante horizontale serait traitée localement, en effet des disparités horizontales seules donnent une perception de relief (Julesz, 1971 ; Howard et Rogers, 2002) ; par comparaison, la composante verticale serait traitée globalement, c'est pourquoi des disparités verticales présentées seules ne produisent aucune perception de relief (Nielsen et Poggio, 1984).

Le traitement de la composante verticale serait global, comme nous l'avons introduit dans le paragraphe sur l'interaction entre les disparités horizontales et verticales (§ II.4). Selon certains auteurs, les disparités verticales donnent des informations sur la distance absolue et l'excentricité d'une surface, ou bien son orientation, sa distance (Gillam et Lawergren, 1983 ; Gillam *et al.*, 1988a ; Duke et Howard, 2005). Selon Banks *et al.* (2002), la disparité verticale n'est pas utilisée pour le calcul de l'azimut du stimulus. Par contre, le système visuel utiliserait les disparités verticales pour estimer les distances des surfaces plutôt que pour estimer la convergence des yeux. En effet, les disparités verticales semblent utilisées pour évaluer les disparités horizontales définissant d'autres plans que le plan de fixation (Duke et Howard, 2005).

### II.5.1 Les interactions locales

La perception de relief relatif de deux objets, utilisant uniquement des indices stéréoscopiques, est influencée par la présence d'autres objets à proximité dans le champ visuel (Mitchison et Westheimer, 1984). Le terme de « saillance » d'un objet visuel ( $L$ ) définit la somme des disparités horizontales – pondérée d'un facteur de poids ( $\omega_i$ ) – relatives entre un objet ( $d$ ) et les objets voisins ( $d_i$ ) :  $L = \sum \omega_i (d_i - d)$ . Le système visuel utilise la « saillance » pour déterminer dans une scène visuelle quels sont les points coplanaires et évaluer les bords (discontinuité de gradient) entre des surfaces planes. Les larges variations de disparité horizontale permettent de détecter les bords : le système stéréoscopique traite les bords des surfaces, i.e. les discontinuités de disparité, plus rapidement et plus précisément qu'un gradient de disparité constant appliqué sur toute la surface (Gillam *et al.*, 1984). Pourtant, la performance pour la discrimination d'inclinaison n'est pas améliorée par une discontinuité du gradient de disparité (Lunn et Morgan, 1997).

D'autre part, des phénomènes d'attraction et de répulsion ont été mis en évidence pour des disparités horizontales (Westheimer, 1986 ; Westheimer et Levi, 1987) : des figures adjacentes s'attirent en profondeur – réduction de la disparité – quand elles sont proches, et se repoussent – les différences de disparité sont augmentées – quand leur séparation dépasse une distance critique (d'environ 2 à 8 minutes d'arc au niveau de la fovéa). L'interaction de disparité semble être un phénomène isolé. L'attraction apparente entre des éléments de disparités similaires serait probablement due à un moyennage des disparités. Les effets de répulsion pour les disparités plus importantes sembleraient dus à des interactions monoculaires (Howard et Rogers, 2002).

Des interactions locales de disparités verticales n'ont pas été mises en évidence, nous avons vu précédemment (cf. § II.4) que les interactions locales concernant les disparités verticales sont observées sur les disparités horizontales. Par exemple, des manipulations de la disparité verticale peuvent produire des effets locaux sur la profondeur, alors que la disparité verticale est insensible aux variations de profondeur locales (Bishop, 1996). Ces interactions locales de la disparité verticale ont lieu sur la profondeur perçue par la disparité horizontale.

### II.5.2 Les effets consécutifs ou post-effets de relief

L'étude des post-effets de relief, encore appelés effets consécutifs du relief ou effets de contraste successif dans la perception de relief, permet également d'étudier les mécanismes liés au traitement des disparités. Les effets consécutifs dans la perception de la profondeur binoculaire sont généralement étudiés avec des stéréogrammes à points aléatoires : un stimulus d'adaptation perceptuelle, contenant des disparités, est présenté pendant un certain temps (de 500 ms à 8 s selon les auteurs) ; la présentation consécutive d'une surface plane,

sans disparité, sera perçue déformée ; cette déformation peut être « annulée » par ajout de disparité, permettant de quantifier ce post-effet.

Pour les disparités horizontales, croisées ou homonymes, un post-effet maximal de relief est obtenu pour un stimulus d'adaptation (présenté pendant 500 ms) de 6 à 8 minutes d'arc. Une absence de post-effet est obtenue si les stimuli d'adaptation et de test diffèrent de plus de 16 minutes d'arc. Long et Over (1973) en concluent que le système visuel humain possède des canaux nerveux qui répondent à la disparité binoculaire. Une adaptation de 8 secondes à une corrugation sinusoïdale, puis la présentation d'une surface plane donne une perception de corrugation sinusoïdale en opposition de phase (post-effet). Une surface de corrugation sinusoïdale en phase avec la surface d'adaptation de départ permet d'annuler le post-effet. Le post-effet se produirait à un niveau plus tardif du traitement visuel, au niveau du traitement de la profondeur elle-même (Graham et Rogers, 1982). De plus, le post-effet est toujours négatif, il est maximal quand la surface d'adaptation et la surface test sont présentées dans le même plan de profondeur et diminue avec l'éloignement de ces deux plans. Ces observations montrent que le système stéréoscopique humain encode les changements spatiaux de disparité en utilisant des canaux localisés dans les plans de disparité (Lee, 1999). D'autre part, l'étude du post-effet d'inclinaison a permis de montrer que l'inclinaison (la rotation de la surface par rapport à un axe horizontal ou vertical) et l'orientation (la rotation de la surface autour de son centre), bien que mathématiquement indépendant, ne sont pas traitées indépendamment. Seyama *et al.* (2000) proposent un modèle de traitement où il y aurait plusieurs détecteurs d'inclinaison ayant également une sélectivité à l'orientation, et un simple détecteur d'orientation. Enfin, la forme de la surface d'adaptation (disque, anneau et rectangle) affecte peu l'importance du post-effet, et la présence de post-effet ne dépend pas toujours de la position rétinienne stimulée (par le recouvrement ou le décalage entre la surface d'adaptation et le test). Ce phénomène pourrait s'expliquer par un mécanisme de traitement du relief de plus haut niveau (Taya *et al.*, 2005).

Pour la disparité verticale, un post-effet attractif, ou positif, est mis en évidence après une adaptation à un stimulus présentant un gradient de disparité verticale (ou rapport de taille verticale, VSR). Ce post-effet est plus faible quand la disparité verticale est en conflit avec une information de disparité horizontale. Enfin, quand les signaux de position des yeux et le rapport de taille verticale sont en conflit, il y aurait une recalibration dans l'utilisation des signaux de position extra-rétinienne des yeux (Duke *et al.*, 2006).

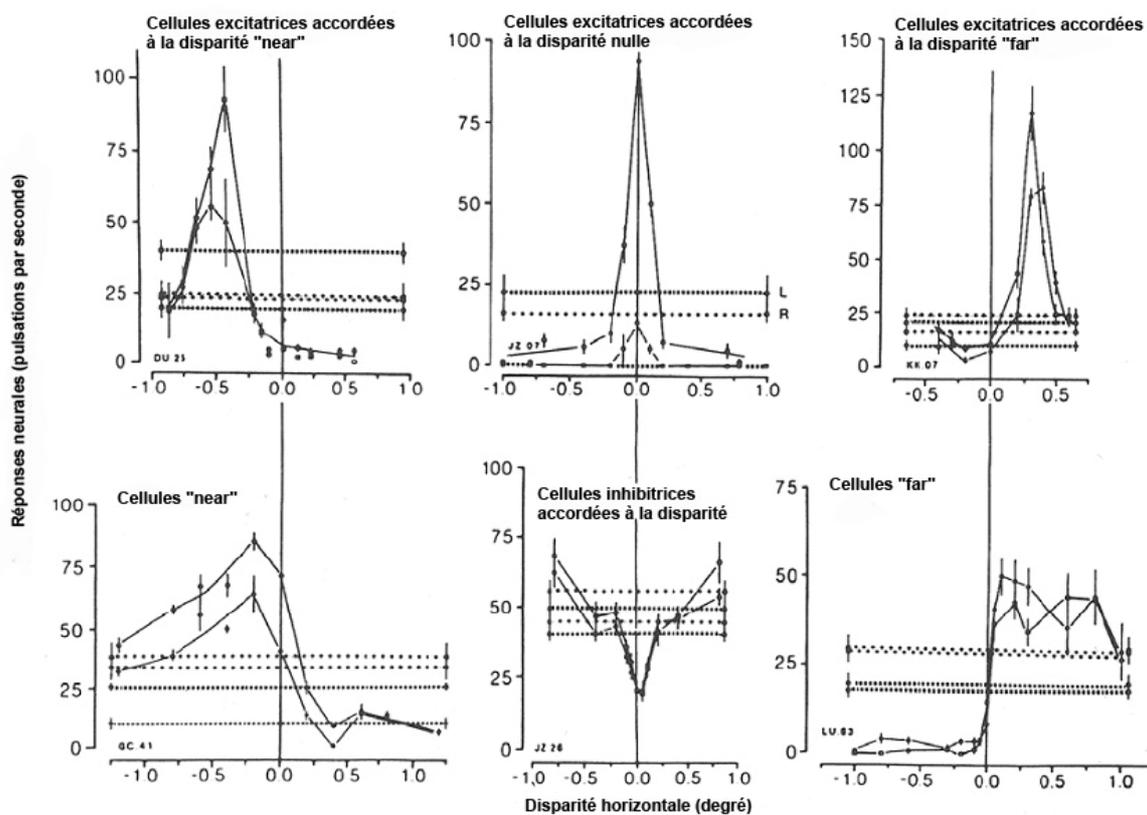
### **II.5.3 L'apprentissage perceptif**

L'apprentissage perceptif est un entraînement, par répétition, qui produit une amélioration des performances. Un apprentissage perceptif est observé pour la discrimination de relief par les stéréogrammes à points aléatoires. Cet apprentissage perceptif améliore la performance des tâches visuelles dont la perception de profondeur par les stéréogrammes à

points aléatoires. Il s'agit d'un ajustement dans le cerveau qui dure au moins six mois. Cet ajustement améliore les seuils stéréoscopiques mais ne modifie pas la tolérance du système stéréoscopique à un certain pourcentage de corrélation du stimulus (Gantz *et al.*, 2007). La perception de la profondeur est donc particulièrement sensible à l'apprentissage ou la répétition des tests : le temps pour percevoir le relief diminue avec les observations répétées. Pour des expériences psychophysiques où les mesures sont généralement répétées un certain nombre de fois, il faut donc tenir compte de ces effets d'apprentissage dans le temps.

## **II.6 Les mécanismes neuronaux impliqués dans le traitement des disparités**

Parmi les cellules binoculaires présentes dans V1, certaines cellules répondent aux disparités nulles (l'horoptère), d'autres cellules répondent pour les positions en avant de l'horoptère, et d'autres encore pour les positions en arrière. Poggio et Poggio (1984, cité par Bourdy, 1989) ont étudié sur des singes éveillés les deux types de cellules corticales suivantes : les *cellules accordées à la disparité*, pour une disparité nulle ou de quelques minutes d'arc ; les *cellules réciproques* répondant à des disparités plus importantes, soit pour les disparités homonymes (cellules « far », pour les objets en arrière du point de fixation), soit pour les disparités croisées (cellules « near », pour des objets plus proches). Poggio *et al.* (1985) ont analysé la réponse des neurones des cortex strié (V1) et pré-strié (V2) du macaque aux RDS dynamiques : les cellules « far » sont excitées par les disparités homonymes et inhibées par les disparités croisées ; et inversement, les cellules « near » sont excitées par les disparités croisées et inhibées par les disparités homonymes (Figure 23). De plus, il existe une corrélation entre la sensibilité aux RDS et l'organisation des champs récepteurs des cellules simples et complexes. Les cellules qui répondent aux RDS sont complexes, ainsi les cellules complexes sont les seules capables de résoudre le problème de l'appariement des éléments des images des deux yeux. Ces trois types de cellules, accordées à la disparité et réciproques (near / far), semblent représenter un stade précoce dans le traitement de l'information de disparité d'une scène visuelle (Hubel, 1988). Dans l'aire V1, l'activité des neurones sélectifs à la disparité horizontale peut être modulée par des facteurs extra-rétiniens. En effet, la réponse des neurones visuels de V1 est affectée par le changement de distance de fixation, dépendant de facteurs extra-rétiniens tels que l'accommodation et la vergence (Trotter *et al.*, 1992).



**Figure 23 - Profils de sensibilité à la disparité pour des cellules corticales du macaque** (d'après Poggio, 1991) : les cellules accordées à la disparité binoculaire, excitatrices (en haut) et inhibitrices (en bas, au centre) ; les cellules à sensibilité réciproque, excitées par les disparités homonymes et inhibées par les disparités croisées (en bas, à droite) et excitées par les disparités croisées et inhibées par les disparités homonymes (en bas, à gauche).

Ces études se sont intéressées essentiellement à la disparité horizontale dans le champ visuel central, mais peu d'études se sont penchées sur la disparité verticale. Notamment, dans le champ visuel central, autour de la fovéa, les disparités verticales sont naturellement faibles ou nulles, expliquant la faible présence de cellules sélectives à la disparité verticale dans la région centrale de V1 correspondant à la zone fovéale du champ visuel. Dans les régions corticales correspondant aux représentations parafovéales du champ visuel, i.e. le bord de la scissure calcarine pour V1 et V2, la présence de cellules sélectives aux disparités horizontales et verticales est relativement importante, de même que de cellules sélectives uniquement aux disparités verticales ou uniquement aux disparités horizontales (Durand *et al.*, 2002). Dans les régions dites parafovéales de V1 et V2, les cellules sélectives à la disparité verticale présentent la même diversité dans les profils de réponse que les cellules sélectives à la disparité horizontale, on retrouve : des cellules excitatrices / inhibitrices *accordées à la disparité* pour les disparités proches de  $0^\circ$ , et des cellules *near / far* pour les disparités plus grandes selon leur signe (Figure 23). Il existe donc un réel encodage de la disparité verticale, partageant un processus neural commun avec l'encodage de la disparité horizontale. On observe une spécialisation pour l'encodage de la disparité horizontale dans la représentation centrale du champ visuel dans l'aire V1. Pour la représentation périphérique dans V1,

l'encodage est similaire pour les disparités horizontales et verticales. Dans ce dernier cas, la disparité préférée est donc un paramètre à deux dimensions, par opposition à la représentation centrale où elle est un paramètre à une dimension (Durand *et al.*, 2007).

Matthews *et al.* (2003) ont proposé un modèle où l'organisation des détecteurs de disparité en périphérie serait radiale, considérant que la disparité est encodée d'une manière dépendant de l'orientation. En effet, les résultats montrent qu'au premier stade cortical du traitement binoculaire, beaucoup de neurones de V1 sont sélectifs aux disparités horizontales et verticales, et leurs réponses à ces composantes de disparité sont étroitement liées à l'orientation de leur champ récepteur. Les détecteurs de disparité sont orientés plutôt verticalement (biais vertical) au niveau du champ visuel central et plutôt alignés avec l'axe polaire (biais radial) en périphérie (Durand *et al.*, 2007). Les cellules avec des champs récepteurs orientés verticalement sont bien adaptées pour encoder la disparité horizontale, en champ central. Par contre, en périphérie, les disparités horizontales et verticales sont encodées sur des plages de valeurs similaires et les détecteurs de disparité ont une organisation radiale.

Par ailleurs, le système magnocellulaire répondrait mieux au relief, il localiserait précisément « où » se trouve le stimulus (Levine, 2000). Le système magnocellulaire constitue la voie dorsale, qui est située en majorité dans le cortex pariétal postérieur et ses aires adjacentes incluant MT (Middle Temporal ou V5), MST (Medial Superior Temporal) et LIP (Lateral IntraParietal) entre autres. Également, au niveau de l'aire V3A, des réponses neuronales importantes aux disparités seraient observées semblant indiquer que l'aire V3A serait spécialisée dans le traitement stéréoscopique (Backus *et al.*, 2001).

L'encodage des disparités binoculaires montre donc une dissociation entre les représentations centrale et périphérique du champ visuel au niveau de l'aire V1, qui rejoint les résultats des expériences psychophysiques : le champ visuel central comporte principalement des disparités horizontales, dans les scènes naturelles, les disparités verticales y sont généralement proches de zéro, alors qu'en périphérie elles deviennent non négligeables. Cependant, si les disparités horizontales sont bien reconnues comme traitées localement, les disparités verticales doivent également avoir un rôle local, en périphérie du champ visuel.

### III Objectifs de l'étude

Ce premier chapitre nous a montré la complexité du traitement des différentes disparités binoculaires qui conduisent à la perception de la profondeur et du relief.

Dans l'environnement naturel, le système visuel, sauf dans certains cas pathologiques, fusionne les deux images rétiniennes et doit traiter soit des modulations de disparités discrètes (perception en avant ou en arrière du point de fixation), soit des modulations de disparités continues (perception de déformations de surface : inclinaison de plan, courbure) pour en extraire une sensation de profondeur. Les études citées dans cette introduction ont montré que la sensibilité à la profondeur dépendait du caractère continu ou discontinu de la disparité. Il faut aussi remarquer que les nombreuses études exposées dans ce chapitre concernent plus l'aspect qualitatif des disparités, dans le but de comprendre le traitement des disparités, que l'aspect quantitatif. Enfin, la perception d'une surface plane et les conditions pour lesquelles les surfaces sont perçues comme planes ont été largement étudiées, mais peu les variations des disparités binoculaires qui entraînent la perception de surfaces non planes dans le champ visuel périphérique.

Les techniques de réalités virtuelles vont nous permettre de simuler les deux images rétiniennes et de modifier indépendamment les paramètres de chaque image afin de comprendre comment sont combinées les informations contenues dans ces images. En particulier cette technique, utilisée avec des stéréogrammes cyclopéens, permet d'étudier le rôle des disparités binoculaires dans la perception tridimensionnelle, en supprimant les autres indices de profondeur.

Pour des images naturelles, des disparités binoculaires, continues et discontinues, sont présentes dans tout le champ visuel et la question se pose de savoir comment leur répartition influence la perception de profondeur. De plus, la distribution des disparités présentes dans les scènes visuelles naturelles peut être modifiée par l'apposition d'un système optique, par exemple, devant un seul œil ou les deux yeux. Ce système optique peut être un verre ophtalmique, couramment utilisé pour corriger un défaut de puissance, ou amétropie, de l'œil. Parce qu'il compense une erreur de réfraction, le verre ophtalmique présente une puissance dioptrique entraînant des effets prismatiques dans tout le champ du verre. L'exemple largement étudié dans la littérature, en particulier par Ogle (1950), est l'apposition d'un verre cylindrique devant un seul œil produisant selon son orientation (à 0 ou 90°) *l'effet induit* ou *l'effet géométrique*. Le verre cylindrique introduit un gradient vertical de la disparité verticale ou un gradient horizontal de la disparité horizontale entre les deux images rétiniennes (disparités de compression-expansion), donnant une perception de rotation d'un plan par

rapport à un axe vertical. Des disparités binoculaires peuvent donc s'ajouter à celles définissant naturellement la forme tridimensionnelle des objets.

Les effets induit et géométrique sont des cas particuliers de port de verres correcteurs, où un seul œil présenterait un type d'astigmatisme bien précis. Néanmoins, ces exemples montrent bien que la correction d'un défaut de puissance par des verres ophtalmiques peut produire des déformations de la perception du relief et de la profondeur, par introduction de disparités. La diversité des corrections optiques, observées sur l'ensemble des êtres humains, est grande, d'une part du point de vue de la puissance, et d'autre part du point de vue du mode de compensation utilisé (verres unifocaux pour la vision de loin, verres « double-foyers » ou multifocaux pour la vision de loin et de près). Aussi seront étudiées les disparités binoculaires introduites par des couples de verres ophtalmiques caractéristiques (correction myopique, hypermétropique, astigmatique identique sur les deux yeux, ou différence de correction entre les deux yeux, etc.). Un premier chapitre sera donc consacré à l'analyse des disparités binoculaires, horizontales et verticales, induites par des couples de verres ophtalmiques en fonction de la puissance des verres et d'autres paramètres spécifiques aux verres, que l'on peut faire varier.

L'analyse des distributions de disparités introduites par les verres ophtalmiques unifocaux mettra en évidence l'aspect continu des variations de la disparité horizontale dans le champ visuel. La question que posera le chapitre suivant sera de savoir comment appliquer des disparités horizontales (leur intensité, leurs variations et leur excentricité dans le champ visuel) et quelle quantité maximale il est possible d'introduire avant qu'une variation de profondeur soit juste perçue par rapport à un plan de référence. L'expérience psychophysique réalisée dans ce chapitre s'intéressera plus particulièrement au sens de la déformation perçue en fonction de la variation continue de la disparité horizontale (ou gradient) et de l'excentricité dans le champ visuel binoculaire.

Les disparités verticales semblent jouer un rôle principalement dans la périphérie du champ visuel et, à l'exception du cas de l'effet induit, elles semblent ne pas donner une perception de relief à elles seules. Leur rôle, bien qu'encore sujet à controverses, semble être mis en évidence dans leur combinaison avec les disparités horizontales. Il est donc plus pertinent de les étudier avec des patterns de disparités horizontales connus. Un dernier chapitre d'expériences sera ainsi consacré à la combinaison des disparités verticales et des disparités horizontales. Dans ces expériences, la disparité verticale sera introduite selon un pattern observé pour des couples de verres ophtalmiques, mais correspondant également aux disparités verticales présentes dans les formes tridimensionnelles obtenues avec les gradients de disparité horizontale de la précédente expérience. Le but de ces expériences est de comprendre comment agissent les disparités verticales sur la perception de profondeur par la disparité horizontale.

Enfin, l'ensemble de ces résultats expérimentaux sera discuté au regard de la description des disparités binoculaires introduites par des verres ophtalmiques, afin d'analyser le possible impact de ces disparités sur la perception tridimensionnelle des porteurs et éventuellement les moyens d'y remédier.

## Chapitre 2. Les verres optiques unifocaux

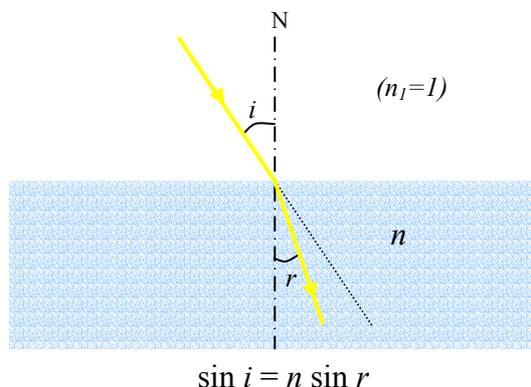
L'objet de la partie appliquée de ce travail de recherche est de comprendre comment les disparités introduites par des verres optiques modifient la perception de la profondeur et du relief. Pour commencer, ce chapitre s'intéresse aux disparités binoculaires induites par des verres optiques, et plus exactement des verres unifocaux : la première partie introduira l'optique optique et la correction des anomalies de la réfraction par les verres optiques ; la seconde partie présentera la méthodologie utilisée pour calculer les disparités binoculaires à partir des distorsions monoculaires ; la troisième partie décrira, par le biais d'un article, les disparités observées pour des couples de verres optiques unifocaux en jouant sur plusieurs paramètres liés au porteur ou à la géométrie des verres ; et enfin la dernière partie analysera plus précisément les répartitions de disparités produites par les verres optiques pour envisager les études expérimentales.

### ***I Présentation générale de l'optique optique***

#### **I.1 Les propriétés optiques du verre**

Le verre optique est constitué d'un matériau transparent, qui présente une géométrie et des dimensions calculées pour que la combinaison résultante produise sur la lumière les effets désirés (les propriétés optiques du verre). Le matériau transparent peut être minéral ou organique, et il est caractérisé par son *indice de réfraction* permettant de quantifier la déviation d'un faisceau lumineux au passage de l'air dans ce milieu. L'indice de réfraction d'un milieu est défini par le rapport de la célérité de la lumière dans le vide ( $C_0$ ) sur la vitesse de propagation ( $C$ ) dans le milieu :  $n = \frac{C_0}{C}$ . L'indice  $n$  du matériau est obtenu par la formule suivante :  $\sin i = n \cdot \sin r$ , où  $i$  est l'angle d'incidence, dans l'air, du faisceau lumineux par rapport à la normale à la surface du verre (N) et  $r$  l'angle réfracté, par rapport à N également, du faisceau lumineux par le matériau (Figure 24). Cette formule est obtenue à partir de la loi de Snell-Descartes qui définit le comportement angulaire des rayons lors de la réfraction :  $n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin r$ , où  $n_1$  et  $n_2$  sont les indices des milieux 1 et 2 ; dans notre cas,  $n_1 = 1$ , il s'agit de l'air. Le rayon incident et le rayon réfracté par le matériau sont dans le même plan. Pour une même incidence, plus l'indice d'un milieu est élevé, plus la lumière qui y pénètre est déviée dans son trajet. La déviation du rayon lumineux ne dépend que de l'angle d'incidence

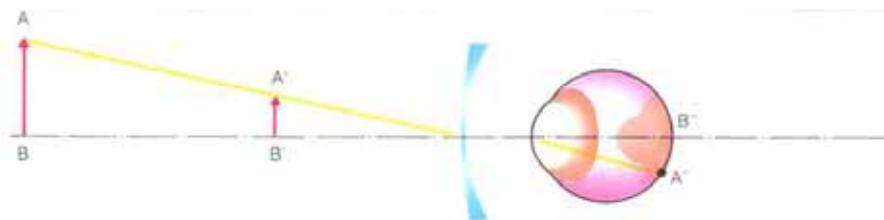
du rayon et de l'indice du verre. Les indices de réfraction des matériaux principalement utilisés en optique ophtalmique s'étendent approximativement de 1,5 à 1,9.



**Figure 24 - définition de l'indice de réfraction  $n$  d'un matériau :**  $i$  représente l'angle d'incidence dans l'air et  $r$  l'angle réfracté par le matériau ; l'indice de l'air ( $n_1$ ) vaut 1 ; N est la normale à la surface du matériau.

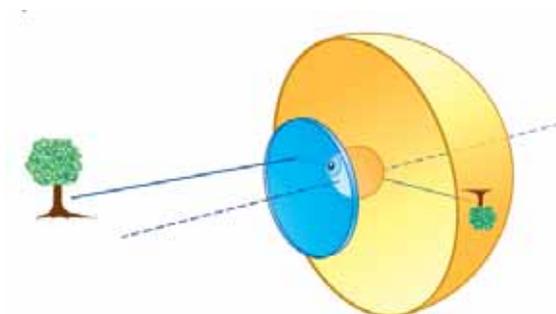
Le verre ophtalmique est donc un matériau d'indice  $n$  dans l'air (d'indice 1). La surface qui sépare l'air du verre s'appelle un *dioptre*. Un dioptre sépare deux milieux d'indices différents. Le verre est constitué de deux dioptres qui séparent le matériau de l'air. Si les deux faces du verre sont planes et parallèles, le faisceau incident et le faisceau émergent (faisceau après la traversée du verre) sont parallèles. Maintenant, si les deux dioptres ne sont pas parallèles, les faisceaux incident et émergent ne sont plus parallèles. C'est pourquoi le verre ophtalmique est essentiellement caractérisé par la courbure de ses faces (donnée par les rayons de courbures des faces avant et arrière du verre), mais également les épaisseurs, au centre et aux bords du verre, et son diamètre. Les surfaces définissant la courbure des faces peuvent être sphériques, cylindriques, toriques, planes ou progressives. Elles peuvent être concaves ou convexes. La surface est définie par trois grandeurs qui lui donnent ses propriétés optiques : l'indice  $n$  du verre, le rayon de courbure  $R$ , et le sens de la convexité (par rapport à l'air). Les verres ophtalmiques sont obtenus par la combinaison de deux de ces surfaces.

Les propriétés optiques du matériau agissent ainsi sur la lumière et permettent de produire l'effet correcteur recherché : le rôle d'un verre ophtalmique, convenablement déterminé, est de donner d'un objet AB qui serait vu flou à l'œil nu (car il ne se projette pas sur la rétine), une image A'B' qui, elle, sera vue nette, sa projection se trouvant sur la rétine de cet œil (Figure 25).



**Figure 25 - Image perçue avec un verre ophtalmique :** le verre ophtalmique donne une image A'B' de l'objet AB. A'B' devient le nouvel objet pour l'œil dont l'image A''B'' se trouve dans le plan de la rétine.

Le verre ophtalmique unifocal, ou simple foyer, est un système conçu pour former l'image des objets éloignés sur le remotum (Figure 26). Le punctum remotum est le conjugué optique objet de la fovéa de l'œil, sans accommodation. L'image d'un point objet formé sur le punctum remotum se trouve sur la rétine. Le punctum remotum se trouve à l'infini pour un œil emmétrope, et à une distance finie ou virtuelle pour les amétropes.



**Figure 26 - Formation de l'image par un verre sur la sphère du remotum.** Cette sphère abstraite représente le conjugué optique objet de la fovéa de l'œil en rotation, sans accommodation.

La puissance  $D$  d'un dioptre se calcule par la formule suivante :  $D = \frac{n-1}{R}$ ,  $D$  étant exprimée en dioptries et  $R$  le rayon du dioptre en mètre. Si le dioptre est *convexe* sur l'air, la puissance sera *positive* et si le dioptre est *concave* sur l'air, sa puissance sera *negative*. Les propriétés optiques du verre sont la résultante des propriétés de chacune des faces, avant et arrière, du verre.

Les verres ophtalmiques forment donc des images dans le plan de la rétine des objets appartenant à la scène visuelle. A cause des effets prismatiques, ces images sont déformées. Les effets prismatiques sont liés à tous les paramètres locaux du verre (indice, épaisseur, courbures, hauteur du rayon sur le verre). La déviation d'un rayon lumineux (en dehors de l'axe optique) par les deux dioptres d'un verre est équivalente, pour chaque point d'incidence du verre, à la déviation du même rayon lumineux à travers un prisme, dont les deux faces, constituant l'angle apical du prisme, sont les tangentes aux dioptres du verre aux points d'incidence. On parle alors d'effets prismatiques du verre, dus à sa puissance. La courbure des faces avant et arrière crée une multitude de prismes locaux. Les effets de ces multiples prismes vont produire une image déformée des objets et non juste un agrandissement ou un rétrécissement. On parle alors de *distorsion* : un défaut d'un système optique dans lequel le grossissement varie avec la distance angulaire à l'axe optique faisant que les droites apparaissent courbes. Les distorsions sont le résultat des effets prismatiques sur la vision périphérique, considérant que l'œil fixe un point précis. Par exemple, une grille régulière (Figure 28a) vue au travers d'un verre concave ou de puissance négative, sera perçue déformée en barillet (Figure 28b), et vue à travers un verre convexe ou puissance positive, sera perçue déformée en coussinet (Figure 28c).

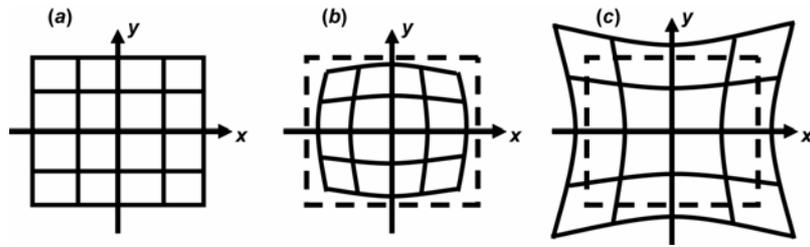


Figure 28 - représentation schématique des effets de la distorsion, obtenues avec des verres sphériques, sur une grille régulière (a) vue à travers un verre concave : distorsion en barillet (b) ; et à travers un verre convexe : distorsion en coussinet (c).

Les distorsions, produites par un verre sphérique, modifient la forme de l'image et sont causées par la puissance d'une surface sphérique qui augmente vers la périphérie. Quand l'œil ne bouge pas et fixe un point précis, il s'agit de *distorsions statiques* et quand l'œil bouge, il s'agit de *distorsions dynamiques*.

## 1.2 La correction des amétropies et la presbytie

Les anomalies de la réfraction, ou amétropies, sont caractérisées par le fait que l'image d'un objet éloigné, à travers le système optique de l'œil (cornée + cristallin), ne se forme pas dans le plan de la rétine : elle se situe en avant de la rétine pour un œil *myope*, en d'autres termes le punctum remotum du myope se trouve à une distance finie ; pour un œil *hypermétrope*, l'image d'un objet éloigné se trouve en arrière de la rétine et le punctum remotum est virtuel. Les verres dits concaves, ou négatifs, permettent de corriger les yeux myopes, et les verres convexes, ou positifs, corrigent les yeux hypermétropes. D'autres amétropies existent, telles que l'*astigmatisme* corrigé par un système optique sphéro-cylindrique, et non purement sphérique d'un œil myope pur ou d'un œil hypermétrope pur. Dans le cas de l'astigmatisme, la déformation de l'image n'est pas identique dans toutes les directions (Figure 27). Les amétropies sont corrigées par des *verres unifocaux*.

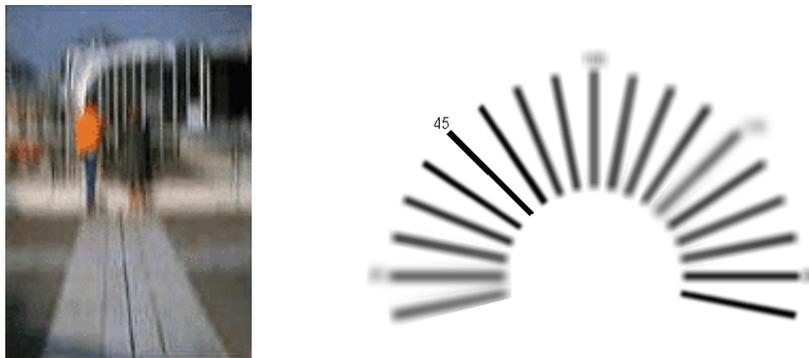
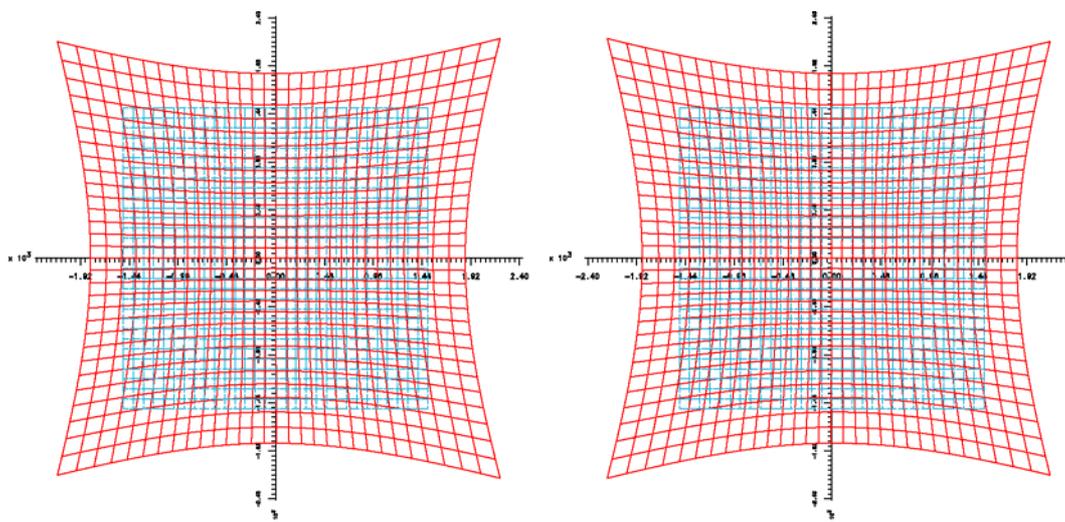


Figure 27 - Illustrations de la vision d'un astigmate. Une direction est perçue plus nette que les autres.

Enfin, la *presbytie*, qui n'est pas une amétropie, correspond à une diminution de la capacité d'accommodation (produite par la modification de la forme, donc de la puissance, du

cristallin) avec l'âge. L'accommodation permet de garder l'image des objets sur la rétine entre la vision de loin et la vision de près. La presbytie est un phénomène physiologique lié à l'âge qui rend l'accommodation de plus en plus difficile, et nécessite donc le port de verres correcteurs pour la vision de près. Le punctum proximum est l'équivalent du punctum remotum pour la vision de près : il s'agit du conjugué objet de la fovéa quand l'œil accommode au maximum. Pour un œil emmétrope non presbyte, le punctum proximum se trouve à proximité devant l'œil. Avec l'âge, le punctum proximum tend à se rapprocher du punctum remotum, indiquant la diminution de la puissance accommodative de l'œil. Les **verres progressifs**, ou les verres multifocaux, corrigent d'une part les amétropies (myopie, hypermétropie ou astigmatisme), en vision de loin, plaçant l'image des objets éloignés dans le plan du punctum remotum, et d'autre part la presbytie, uniquement en vision de près, plaçant l'image des objets à proximité (par exemple 40 cm) dans le plan du punctum proximum.

La Figure 29 représente pour chaque œil une grille objet (en bleu) observée à travers un verre de puissance +2,00 dioptries, dans les conditions où les yeux ne bougent pas et où le porteur fixe le centre de la grille. Les deux grilles images (en rouge), obtenues à travers chaque verre sphérique, correspondent aux déformations perçues par chacun des deux yeux hypermétropes.



**Figure 29 - Simulation des grilles objet et image, pour un couple de verres de puissance +2,00 δ, et dans les conditions où les yeux ne bougent pas et le porteur fixe le centre de la grille :** la grille objet (traits bleus), de 3000 × 3000 mm, est placée à un mètre du porteur dans le plan objet ; la grille image (traits rouges), obtenue à travers le même verre sphérique, pour l'œil gauche à gauche et pour l'œil droit à droite.

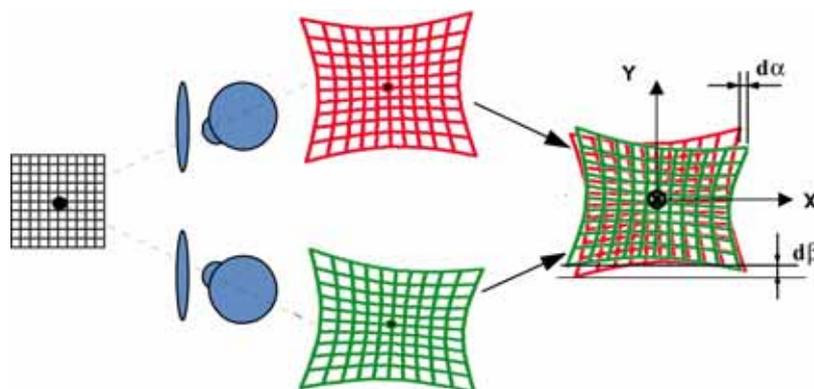
Les déformations décrites dans la Figure 29 sont produites pour chaque œil par un unique verre, convexe dans ce cas, et correspondent donc à la grille vue derrière ce verre. Pour le système binoculaire corrigé par des verres ophtalmiques, chaque œil verra donc une image déformée, pas nécessairement de façon identique. Sauf cas pathologiques, les deux yeux fixent un même point, dans notre exemple le centre de la grille, et voient donc simultanément les deux grilles déformées. Chaque point des deux grilles déformées ne correspondant pas exactement, des disparités binoculaires sont observées entre les deux yeux.

Dans ce chapitre, nous envisageons les distorsions produites par des verres ophtalmiques, sur l'ensemble du champ visuel, quand un œil fixe un point précis. Ces distorsions obtenues pour chaque verre permettent ensuite de calculer les disparités binoculaires induites par un couple de verres ophtalmiques.

## ***II Méthodologie pour le calcul des disparités des verres ophtalmiques***

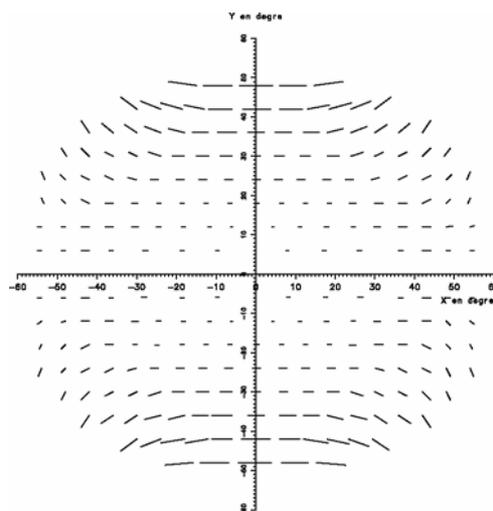
Pour calculer les disparités binoculaires introduites par un couple de verres ophtalmiques, il est nécessaire de connaître les distorsions produites par chacun des deux verres. Pour cela, un logiciel fourni par Essilor (le service Informatique Scientifique, R&D Optique) permet de définir une grille régulière et d'en obtenir la grille déformée par un verre ophtalmique choisi. Plusieurs paramètres doivent être précisés tels que la distance de la grille, la position horizontale et verticale de la grille par rapport au verre, les coordonnées du point fixé dans le plan de la grille, la taille de la grille, le nombre de nœuds, et bien sûr les caractéristiques du verre (indice, puissance, rayon face avant). Le principe de calcul des distorsions en chaque point d'une grille est basé sur une technique de tracé de rayon. La description des calculs et des données d'entrée et de sortie de ce logiciel se trouve en Annexe 3). Les écarts pupillaires sont fixés à 65 mm dans tous les cas. La grille est centrée horizontalement dans le plan médian de la tête et chaque œil a pour point de regard le centre de la grille situé dans le plan horizontal des yeux. A partir des critères communs, le logiciel permet d'obtenir une grille déformée pour chaque œil du couple binoculaire. Les deux grilles déformées doivent avoir leur centre superposé et de mêmes coordonnées que le centre de la grille régulière initiale. Les données en sortie du logiciel sont donc un fichier indiquant les coordonnées (x,y,z) de chaque nœud de la grille initiale et deux fichiers avec les coordonnées (x,y,z) des nœuds correspondants pour les grilles déformées de l'œil droit et de l'œil gauche. A chaque nœud de la grille initiale est attribué un numéro qui est conservé dans les fichiers des grilles déformées afin de faire correspondre les coordonnées de la grille initiale avec celles des deux grilles déformées qui en sont produites.

Le calcul des disparités binoculaires d'un couple de verre utilise les coordonnées de chaque nœud correspondant entre la grille initiale et les grilles déformées. Il est important de s'être assuré au préalable de la convergence des axes de regard sur le centre de chaque grille, c'est-à-dire que le point central de chaque grille, initiale comme déformée, ait une coordonnée horizontale nulle (Figure 30).



**Figure 30 - Calcul des disparités binoculaires :** on vient fusionner le centre des 2 images en déplaçant la nappe gauche pour superposer dans le repère les 2 centres, puis on calcule en chaque nœud les différences OG – OD horizontales (X) et verticales (Y). Exemple d'un couple de verres convexes (positifs).

Les coordonnées d'un point de la grille initiale associées avec les coordonnées du point correspondant de la grille déformée de l'œil droit et de la grille déformée de l'œil gauche vont permettre de calculer les disparités horizontales et verticales en chaque point de la grille initiale. Le détail du programme (appelé *Dispcalc*) permettant de calculer les disparités angulaires à partir des coordonnées en chaque point de la grille initiale se trouve en Annexe 3. *Dispcalc* donne en sortie deux types de fichiers : des fichiers-tableaux indiquant pour chaque point de la grille initiale, défini par ses coordonnées  $(x,y,z)$ , une valeur de disparité horizontale et une valeur de disparité verticale, induite par le couple de verres ophthalmiques sur ce point ; des fichiers-graphiques présentant des cartes représentatives des disparités horizontales et/ou verticales en chaque point de la grille initiale. Les cartes représentent les disparités sous forme de courbes isométriques. Les cartes montrent des lignes de valeur de disparité constante (iso-disparité), les disparités horizontales et verticales sont présentées séparément (la figure 5 de l'article présenté dans le paragraphe suivant, par exemple, montre les cartes d'iso-disparité de couples de verres de +/- 2,00 dioptries). D'autres cartes sont possibles pour visualiser les disparités horizontales et verticales simultanément sous forme de vecteurs, entre le point initial et le point disparate obtenu par les deux verres (exemple d'un couple de verres +2,00 dioptries, Figure 31). Les cartes de vecteurs servent essentiellement dans un but illustratif, donnant une indication sur la proportion respective de chaque composante, horizontale et verticale, de la disparité binoculaire.



**Figure 31 - Carte des vecteurs de composition de la disparité binoculaire, entre la composante horizontale et la composante verticale, pour un couple de verres de +2,00  $\delta$ , une distance de fixation de 1m. L'unité des disparités horizontales et verticales est la minute d'arc et l'échelle des vecteurs correspond à 2 fois les grandeurs de l'échelle d'excentricités x et y.**

Les cartes d'iso-disparité, isolant chacune des composantes et donnant la valeur des disparités point par point, peuvent être plus aisément utilisées pour l'étude des disparités et la comparaison des répartitions de disparités en faisant varier différents paramètres.

### **III Description des disparités des verres unifocaux**

La description des patterns de disparités binoculaires observées pour des couples de verres ophtalmiques, en fonction de la variation de plusieurs paramètres, est présentée ci-après sous la forme d'un article publié dans une revue professionnelle d'optique physiologique, d'optométrie et de contactologie (Devisme *et al.*, 2007a). Après une introduction rappelant les définitions des disparités binoculaires, décomposées en leurs composantes horizontale et verticale, dans la perception du relief et de la profondeur, la méthodologie, indiquant la procédure de calcul des disparités pour tous les points du champ visuel binoculaire, est expliquée. Il s'agit ensuite d'une analyse purement descriptive des disparités horizontales et verticales et de leur modification en fonction de la puissance des verres étudiés, de la distance de fixation, de l'angle d'inclinaison des verres (l'angle pantoscopique, défini dans l'article), le décentrement horizontal des verres, le rayon de courbure de la face avant (la base) et la cambrure des verres (le galbe). Les cartes de disparités, pour des types de corrections spécifiques telles que les verres cylindriques (ou sphéro-cylindriques) utilisés pour corriger les astigmatismes ou encore les différences importantes de correction, appelées anisométries, sont également décrites dans l'article. Les disparités horizontales ou verticales sont présentées sous la forme de cartes d'iso-disparité horizontale ou d'iso-disparité verticale.

# Les disparités binoculaires des verres unifocaux

Les verres correcteurs induisent des modifications bien connues de l'espace perçu à travers eux. Grossissement, rapetissement, étirement, inclinaisons, ... sont des effets classiques. L'étude de Céline Devisme, une jeune chercheuse, évalue leurs impacts sur les disparités binoculaires.

## Résumé

La disparité binoculaire est l'indice le plus pertinent dans la perception de la profondeur jusqu'à 2m<sup>1</sup>. L'apposition de verres ophtalmiques devant les yeux va engendrer une modification de la distribution des disparités binoculaires existant naturellement dans les scènes visuelles. Ces modifications des disparités binoculaires peuvent avoir des répercussions sur la perception du relief et de la profondeur. L'analyse descriptive des disparités binoculaires, horizontales et verticales, produites par des verres ophtalmiques unifocaux permet de mettre en évidence l'influence plus ou moins importante des effets prismatiques dus à la puissance des verres, du décentrement des verres, de la base (rayon de la face avant des verres) et de l'angle pantoscopique. De même, des distributions particulières des disparités sont observées pour les verres cylindriques, les cas d'anisométrie ou encore pour des verres galbés. Cette analyse montre l'importance du centrage des verres en fonction des écarts pupillaires du porteur. De plus, ces disparités binoculaires induites par des couples de verres ophtalmiques vont pouvoir expliquer certaines difficultés rencontrées par les porteurs de corrections très fortes, ou très différentes entre les deux yeux.

## Introduction

La perception de la profondeur est rendue possible grâce à des indices monoculaires et binoculaires présents dans l'environnement visuel. Les indices

monoculaires sont des indices géométriques (perspective, flou, hauteur, taille, texture, occlusion) ou photométriques (perspective aérienne, ombres, brillant-reflet, transparence). Les indices binoculaires sont la vergence (convergence/accommodation) ou bien les disparités (verticale/horizontale, accommodation, géométrique, luminance). D'autres indices peuvent être ajoutés : le mouvement avec la parallaxe (mouvement de la tête ou mouvement de la cible), et des indices cognitifs (la constance de taille). Les interactions entre les indices de profondeur peuvent conduire soit à l'amélioration de la perception de la profondeur quand ils s'ajoutent, soit à sa détérioration quand ils s'opposent, on parle alors de conflit d'indices. Tous les indices n'ont pas la même efficacité sur la perception du relief selon la zone de l'espace visuel considérée. Par exemple, pour la disparité binoculaire, son efficacité s'atténue linéairement avec l'augmentation de la distance par rapport à l'observateur. Ainsi Cutting et Vishton<sup>1</sup> ont défini trois espaces en fonction de la distance d'observation: un espace "personnel" (jusqu'à 2 m), un espace de l'action (entre 2 et 30 m), et un espace éloigné (au-delà de 30 m). Dans l'espace le plus proche, dit "personnel", la disparité binoculaire est un des indices le plus efficace. Les yeux, séparés horizontalement de plusieurs centimètres, observent deux images distinctes d'une même scène visuelle, produisant deux points de vue différents de la même scène. Les disparités binoculaires, ou parallaxe binoculaire, sont les différences de position relative des projections du même objet sur les rétines des deux yeux. Les disparités ou différences entre

Céline Devisme<sup>a,b</sup>,  
Björn Drobe<sup>a</sup>,  
Guillaume  
Giraudet<sup>a</sup>,  
Annie Monot<sup>c</sup>,  
Jacques Droulez<sup>a</sup>

a) LPPA, CNRS,  
Collège de  
France, Paris

b) R&D Optique  
Monde, Essilor  
International

c) Equipe Vision,  
CRCDG, Muséum  
National d'Histoire  
Naturelle, Paris

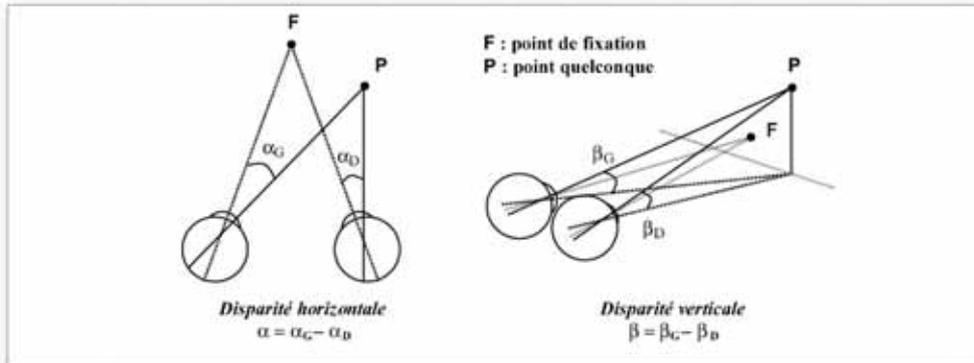


Figure 1

Figure 1 : Schémas illustrant la disparité binoculaire – les deux yeux fixant un point droit devant dans le plan médian de la tête [F], un point quelconque de l'espace [P] sera disparate. Le schéma de gauche représente la disparité horizontale et le schéma de droite la disparité verticale.

l'image rétinienne de l'œil droit et celle de l'œil gauche, présentes dans tout le champ visuel en dehors du point fixé, vont permettre au cerveau de reconstruire précisément un espace tridimensionnel (cf. figure 1).

La *disparité horizontale* ( $\alpha$ ) d'un point quelconque de l'espace est mesurée par la différence d'azimut de ce point entre les deux yeux :  $\alpha = \alpha_G - \alpha_D$ , où  $\alpha_G$  et  $\alpha_D$  sont les azimuts du point disparate avec le point de fixation (angles entre le plan vertical passant par le point disparate et le point nodal de l'œil et le plan vertical passant par le point de fixation et le point nodal du même œil), pour les yeux gauche et droit respectivement (Figure 1). Le lieu des points de disparité horizontale nulle est l'horoptère théorique, il s'agit d'un cercle, appelé cercle de Vieth-Müller, passant par le point de fixation et le point nodal de chaque œil<sup>2</sup>. Par convention, pour un point à l'intérieur du cercle de Vieth-Müller, la disparité est positive et couramment appelée croisée. Pour un point à l'extérieur du cercle de Vieth-Müller, la disparité est négative ou homonyme<sup>3</sup>.

La *disparité verticale* ( $\beta$ ) d'un point quelconque de l'espace est mesurée par la différence d'élévation de ce point dans les deux yeux :  $\beta = \beta_G - \beta_D$ , où  $\beta_G$  et  $\beta_D$  sont les angles d'élévation du point disparate par rapport au plan horizontal, pour les yeux gauche et droit respectivement (Figure 1). Les images de la plupart des scènes visuelles contiennent des différences vertica-

les. Les disparités verticales apparaissent quand un objet sous-tend un angle plus grand pour un œil que pour l'autre, parce qu'il est plus près d'un œil que de l'autre. En d'autres termes, la disparité verticale résulte d'un grossissement différentiel qui apparaît quand le point est plus proche d'un œil que de l'autre, ce qui se produit pour tous les points hors du plan médian de la tête. Notons que les valeurs des disparités d'une scène visuelle dépendent du système de coordonnées choisi pour les mesurer. Le système de coordonnées le plus adapté aux mesures des disparités binoculaires est le repère longitudinal-azimut/latitudinal-élévation, celles-ci n'étant pas affectées par les mouvements de vergence et de version binoculaire. Dans ce repère, pour des yeux alignés verticalement, dans les scènes naturelles, il ne peut y avoir de disparité verticale pour tous les points du plan médian de la tête et du plan horizontal passant par les deux yeux<sup>4</sup>. De plus, les disparités verticales donnent un sens de relief différent selon leur signe et le quadrant du champ visuel considéré (Figure 2). On parlera de sens ou de signe du relief pour indiquer que le point disparate, formé par l'image de l'œil droit et celle de l'œil gauche, se trouve en avant ou en arrière du plan frontal passant par le point de fixation. Un exemple de disparité verticale, appelé « effet induit », peut être mis en évidence grâce à un verre cylindrique de puissance  $(+2,00)0^\circ$  placé devant un œil. L'effet induit est donc le résultat du grossissement vertical de l'image d'un des deux yeux, qui produit, ►

outre un inconfort, une perception de rotation du plan frontal autour d'un axe vertical<sup>5</sup>. La **Figure 2** permet d'expliquer cette perception : si le verre cylindrique susmentionné est placé devant l'œil gauche, l'image de l'œil gauche présentera un grossissement verticalement par rapport à l'image de l'œil droit. Le signe de la disparité verticale sera alors positif dans les quadrants supérieurs, et négatif dans les quadrants inférieurs. Ainsi, le sens du relief perçu sera vers l'avant dans l'hémi-champ droit et vers l'arrière dans l'hémi-champ gauche. Ce conflit entre les différentes perceptions à droite et à gauche du point de fixation serait interprété par le cerveau comme une rotation du plan autour d'un axe vertical (cf. **Figure 2**).

Dans les scènes visuelles, des distributions de disparités binoculaires existent naturellement dans le champ visuel à l'exception du point fixé dans la scène et des points de l'horoptère. Mais il est également possible d'ajouter à ces distributions « naturelles » des patterns de disparités binoculaires, en plaçant par exemple des systèmes optiques devant les yeux. C'est le cas des verres optiques qui sont nécessaires pour corriger les amétropies, mais induisent des disparités binoculaires additionnelles. La présente étude décrit les disparités horizontales et verticales produites par des verres optiques unifocaux, dans les conditions habituelles de port (centrage des verres sur les écarts pupillaires, base standard pour la puissance choisie, etc), selon la correction ou la distance

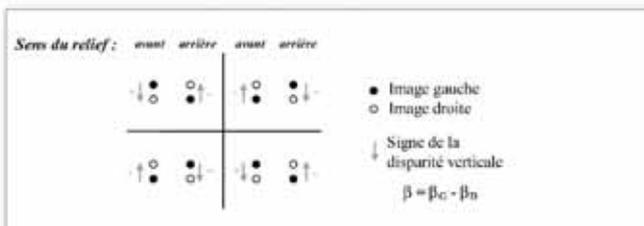


Figure 2

**Figure 2 :** Représentation schématique du décalage des images droite et gauche l'une par rapport à l'autre indiquant le signe de la disparité verticale. Dans chacun des quatre quadrants autour du point de fixation, selon le signe de la disparité on observe un sens du relief différent [d'après Matthews et al.<sup>6</sup>].

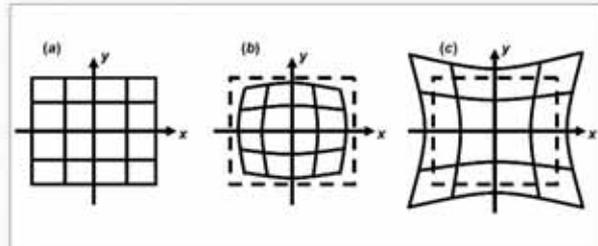


Figure 3

**Figure 3 :** représentation schématique d'une grille régulière (a) vue à travers un verre concave (b) et à travers un verre convexe (c).

de fixation. Puis les implications, en termes de disparités induites par les erreurs de montage, le choix d'une base plus ou moins cambrée (plus plate), voire très cambrée pour des verres galbés, seront envisagées et discutées.

### Méthode

Les disparités binoculaires induites par un couple de verres optiques proviennent des déformations produites par chacun des verres. Chaque verre crée des déformations de la scène visuelle, causées par les effets prismatiques dus à la puissance du verre. Les deux scènes déformées par les verres sont fusionnées, induisant ainsi des disparités binoculaires supplémentaires dans le champ visuel, à l'exception du point de fixation. Pour obtenir les déformations produites par chacun des verres, une grille régulière est placée devant les deux verres (**Figure 3 (a)**), et centrée sur le plan médian des deux verres et le plan horizontal passant par les centres optiques des verres. Pour chaque verre, une grille déformée est obtenue, correspondant à la déformation de la grille régulière à travers le verre étudié. Les verres concaves, ou négatifs, produisent des déformations en barillet (**Figure 3 (b)**) et les verres convexes, ou positifs, des déformations en coussinet (**Figure 3 (c)**). Ces grilles déformées représentent les distorsions du champ visuel produites par un verre, elles sont obtenues par le tracé des rayons passant par le point nodal d'un œil (dont le centre de rotation se trouve 25 mm en arrière du verre) et par chaque point de la grille. Chaque nœud de cette

grille déformée peut donc présenter des coordonnées différentes de celles de la grille régulière initiale (cf. figure 3).

Dans le cas d'un couple de verres ophtalmiques, une grille déformée par verre est ainsi obtenue (figure 4, grilles rouge et verte). Les coordonnées de chaque nœud des grilles déformées pour chacun des deux verres par rapport à la même grille initiale permettent de calculer des valeurs de disparités binoculaires induites. La grille initiale, placée dans un plan frontal, présente déjà des disparités de par sa position, différente de l'horoptère (cf. introduction). Les disparités calculées sont les disparités totales, obtenues avec l'apposition de verres, auxquelles sont soustraites les disparités de la grille initiale. Par conséquent, pour une grille initiale régulière, vue au travers d'un couple de verres ophtalmiques, à chaque nœud correspondent une valeur de disparité horizontale et une valeur de disparité verticale. Notons que le point de fixation, qui est le centre de la grille dans tous les cas, a toujours une disparité nulle, aussi bien en disparité horizontale qu'en disparité verticale. La convergence des yeux sur un point de fixation compense les disparités qui pourraient être présentes (cf. figure 4).

Dans la présente étude, la grille régulière initiale est située dans un plan frontal à la même distance des deux verres dans tous les cas, fixée à 625 mm, cette distance se situant dans l'espace « personnel » défini par Cutting et Vishton<sup>1</sup>. La grille initiale utilisée

compte 31 nœuds horizontaux sur 31 nœuds verticaux pour une dimension de 1,50 m × 1,50 m. Les verres utilisés sont d'indice de réfraction 1,5. De plus, l'écart entre les centres optiques des verres, correspondant à un écart inter-pupillaire moyen, est fixé à 65 mm, et les yeux sont considérés en convergence symétrique. En effet, un observateur fixant binoculairement le centre d'une grille placée à 65 cm, les deux yeux ne regardent pas droit devant (ce qui reviendrait à placer la grille à l'infini), mais convergent vers le point de la grille situé dans le plan médian des deux yeux avec un angle de convergence d'environ 6°. Le champ visuel binoculaire considéré pour les cartes de disparités est de forme elliptique de 120° de grand axe horizontal sur 100° de petit axe vertical, centré sur le point de fixation. Les résultats sont présentés sous la forme de cartes représentant les disparités binoculaires, dans le champ visuel, par des lignes d'iso-disparité horizontale ou

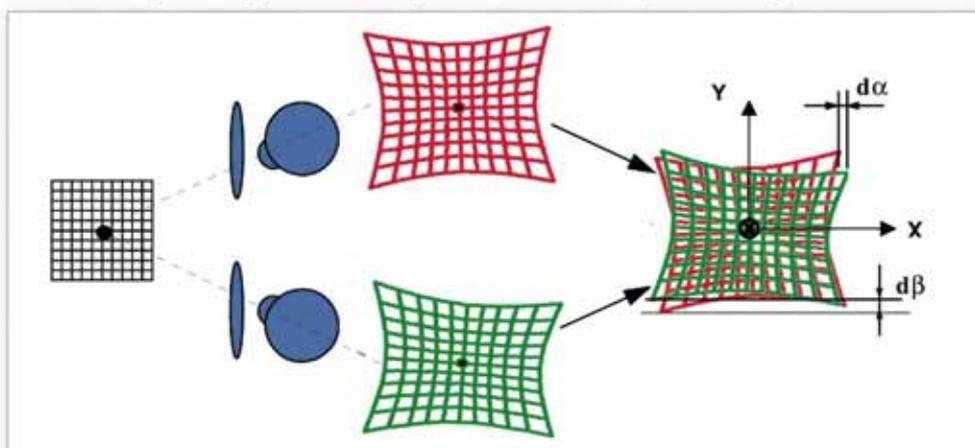


Figure 4

Figure 4 : Calcul des disparités binoculaires : on vient fusionner le centre des 2 images en déplaçant la nappe gauche pour superposer dans le repère les 2 centres, puis on calcule en chaque nœud les différences OG - OD horizontales [X] et verticales [Y]. Exemple d'un couple de verres convexes (positifs).

verticale, l'unité angulaire des disparités étant la minute d'arc. Les lignes d'iso-disparité relient les points de coordonnées, en azimut et élévation, voisines ayant même valeur de disparité.

Les différents paramètres étudiés sont : la puissance (-2,00 δ ; +2,00 δ ; +4,00 δ), ►

la distance de fixation (35 cm, 1m, 2m), la base (ou le rayon de courbure de la face avant du verre, qui dépend de la puissance du verre), l'angle pantoscopique (15°), le décentrement (3 mm temporal ou nasal) et le galbe (15, 30°). Puis, seront analysés les cas particuliers d'anisométrie et d'astigmatisme.

### Description des disparités des verres optiques unifocaux

#### La puissance

Les couples de verres concaves (de puissance négative) créent des disparités horizontales négatives ou homonymes sur une grande partie du champ visuel. Par opposition, les couples de verres convexes (de

puissance positive) produisent des disparités horizontales positives ou croisées sur une grande partie du champ visuel (Figure 5).

La disparité horizontale augmente de façon plus rapide dans le méridien vertical que dans le méridien horizontal. L'augmentation de la disparité horizontale se fait approximativement de façon concentrique selon une ellipse de grand axe horizontal. Ainsi, les champs latéraux droit et gauche présentent peu de disparités, entraînant moins de déformations que les champs supérieur et inférieur. La Figure 5 montre également que les disparités verticales sont nulles dans les méridiens horizontal et vertical. Dans chaque quadrant, la disparité verticale augmente des méridiens horizontal/vertical vers la zone la plus excentrée du quadrant, comme l'indique le graphique de droite de la Figure 6. Le signe des disparités verticales est opposé entre quadrants voisins de telle sorte que le signe du relief est le même dans tout le champ binoculaire des verres (cf. schéma du sens du relief en fonction du signe et du quadrant, Figure 2) : le signe de relief est vers l'arrière pour les couples de verres concaves et vers l'avant pour les couples de verres convexes. Pour un couple de verres concaves, les disparités horizontales étant homonymes, le signe de relief est vers l'arrière et les disparités verticales indiquent également un

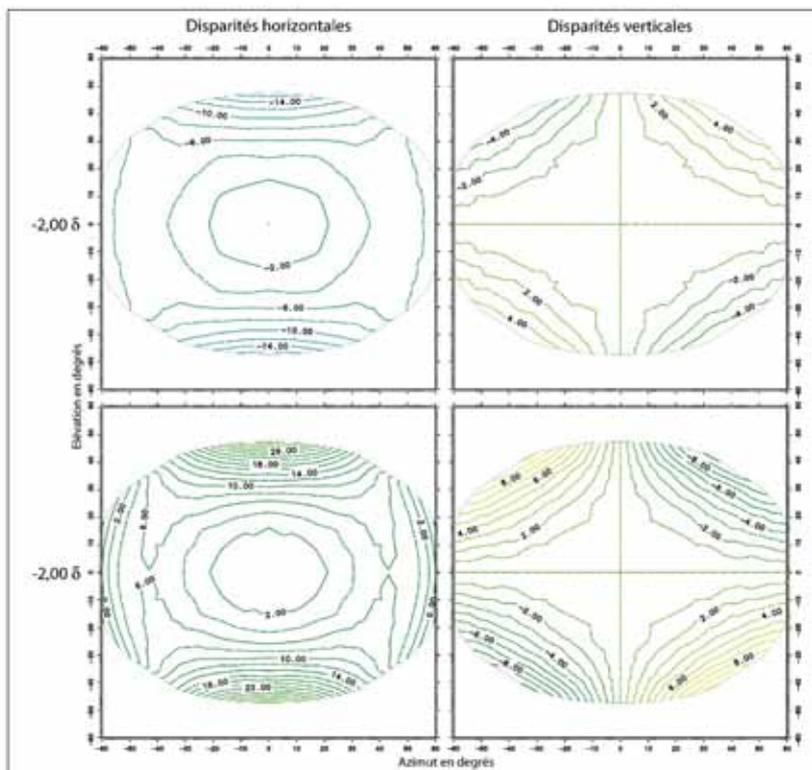
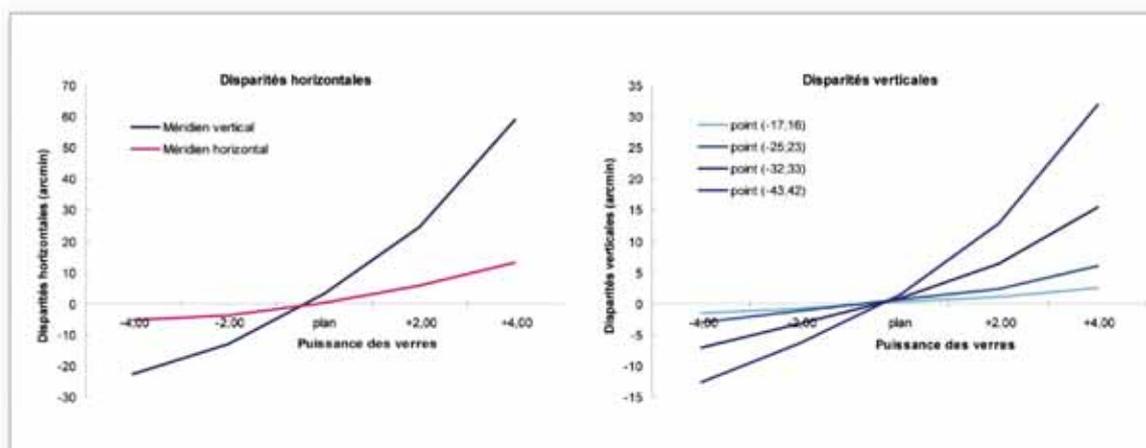


Figure 5

Figure 5 : Cartes d'iso-disparités horizontales (à gauche) et verticales (à droite) pour un couple de verres de puissance  $-2,00 \delta$  (en haut) et un couple de verres de puissance  $+2,00 \delta$  (en bas) : les cartes représentent la valeur de la disparité pour chaque point du champ visuel ; chaque point est défini par ses coordonnées x et y correspondant à l'excentricité par rapport au point de fixation [respectivement l'azimut et l'élevation, notées en degré autour du cadre] ; les mêmes valeurs de disparité sont représentées par une même ligne (continue ou pointillée, avec un pas de 2 arcmin pour les disparités horizontales et de 1 arcmin pour les disparités verticales) ; l'unité des disparités indiquées sur les lignes est la minute d'arc.



signe de relief vers l'arrière. Les disparités horizontales et verticales sont donc de même signe de relief pour les couples de verres sphériques de même puissance (cf. Figure 6).

Avec l'augmentation de la puissance des deux verres, conjointement, on observe une augmentation des disparités horizontales (Figure 6). Notons que les disparités horizontales et verticales sont très faibles pour un verre plan (de puissance nulle), néanmoins elles ne sont pas nulles. La présence de disparités, dans le cas du verre plan, s'explique par le fait que les verres dits « plans » sont constitués de deux dioptries ayant des rayons de courbure non infinis. Entre les couples de verres convexes et les couples de verres concaves, l'augmentation, en valeur absolue, des disparités horizontales en fonction de l'excentricité n'est pas exactement semblable : dans le méridien vertical, l'augmentation de la disparité horizontale avec l'excentricité est plus rapide, à partir de 15-20° d'excentricité, pour les verres convexes que pour les verres concaves (avec des valeurs environ deux fois supérieures vers 40° d'excentricité, cf. Figure 6). Les verres positifs induiront donc plus de déformations que les verres négatifs, en particulier vers le haut et vers le bas du champ visuel binoculaire. Dans le méridien horizontal, les verres concaves et convexes présentent des variations plus semblables. L'asymétrie entre les verres concaves et les verres convexes peut s'expliquer en partie par la présence initiale de disparités positives (croisées) pour des verres de puissance nulle, dues à la courbure des dioptries. Le passage d'une puissance de +2,00 δ à une puissance de +4,00 δ entraîne une augmentation importante des disparités horizontales, à partir de 10° d'excentricité. Ainsi on observe que, dans un disque de 10° de rayon autour du point de fixation, les disparités varient très peu avec l'augmentation de la puissance, et au-delà l'augmentation des disparités horizontales est proportionnelle à l'augmentation de puissance. Les disparités verticales augmentent également avec l'augmentation de puissance, de façon semblable dans les quatre quadrants. De même, il existe une asymétrie de vitesse d'augmentation de la disparité verticale avec la puissance entre les

Figure 6

Figure 6 : variation de la disparité horizontale (à gauche) et de la disparité verticale (à droite) en fonction de la puissance des verres étudiés [-4,00 δ ; -2,00 δ ; plan ; +2,00 δ ; +4,00 δ] pour plusieurs points du champ visuel : pour les disparités horizontales, il s'agit de deux points à 43° d'excentricité sur le méridien horizontal (en rose) et sur le méridien vertical (en bleu) ; pour les disparités verticales, ce sont 4 points (dont les coordonnées sont en légende) d'un même quadrant.

verres convexes et les verres concaves (Figure 6). Par conséquent, les porteurs isométropes, qu'ils soient myopes ou hypermétropes, observeront peu de déformations autour du point de fixation dans un disque de 10° de rayon. En périphérie, au-delà de ce disque de 10°, des déformations de la perception de profondeur pourront être perçues, d'autant plus importantes que la puissance des verres sera importante, et plus particulièrement dans les parties supérieures et inférieures du champ visuel. Les modifications de la profondeur, si elles sont perçues, produiront, dans tout le champ visuel binoculaire, des déformations concaves pour les verres positifs et convexes pour les verres négatifs, où la concavité/convexité est plus importante dans le méridien vertical que dans le méridien horizontal.

#### La distance de fixation

La question que l'on peut se poser est de savoir si les disparités sont les mêmes quelle que soit la distance du point fixé. Le déplacement en profondeur de la grille initiale modifie les disparités ►

horizontales et verticales de la façon suivante : l'éloignement de la grille produit une diminution des disparités et inversement, le rapprochement de la grille par rapport à l'observateur augmente

les disparités (Figure 7). C'est, plus exactement, la valeur de la disparité en chaque point qui augmente proportionnellement avec la diminution de la distance de fixation : par exemple, entre les

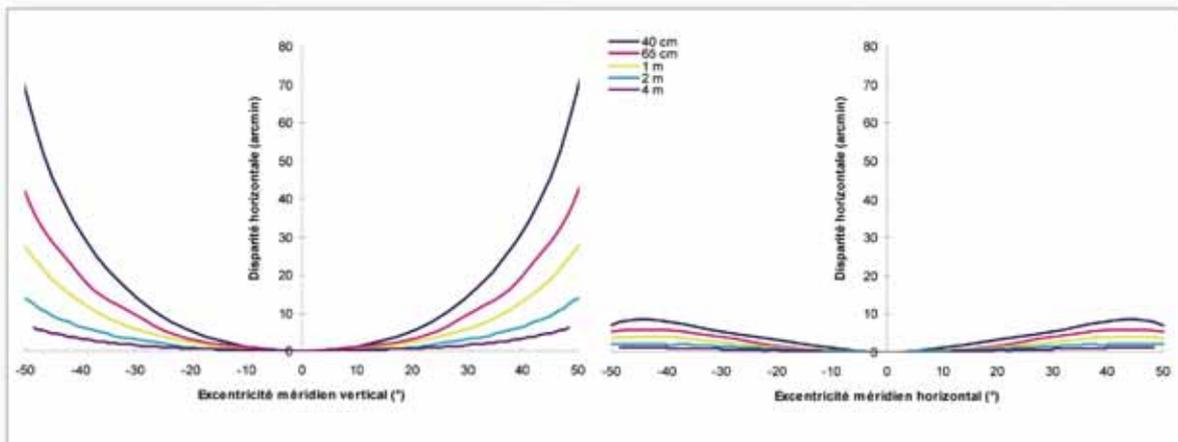


Figure 7

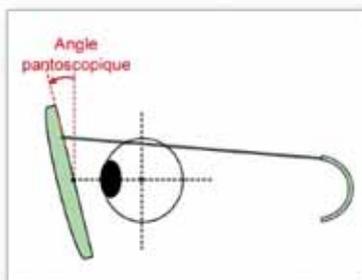
Figure 7 : Variation de la disparité horizontale en fonction de l'excentricité en élévation (à gauche, méridien vertical) et en fonction de l'excentricité azimutale (à droite, méridien horizontal) pour plusieurs distances de fixation (40 cm, 65 cm, 1 m, 2 m, 4 m), pour un couple de verres de +2,00 Δ.

distances 2 m et 1 m, les disparités en chaque point vont être augmentées dans un rapport d'environ 2, de telle sorte que la grille de disparité pour une distance de 1 m présente des disparités deux fois plus importantes que la grille placée à une distance de 2 m. Cette augmentation de la disparité horizontale est plus importante dans le méridien vertical que dans le méridien horizontal. Pour la disparité verticale, on retrouve également l'augmentation de la disparité avec la diminution de la distance conjointement dans chacun des quatre quadrants (cf. Figure 7).

loin, donc des modifications de la profondeur ou des déformations du relief seront plus facilement perçues au près. Le champ visuel pourra être perçu incurvé, plus ou moins concave/convexe avec toujours la plus forte concavité/convexité dans le méridien vertical, quelle que soit la distance. Notons que, dans le cas d'une fixation au-delà de 2 m, les disparités induites par des verres sont faibles, et sachant que l'indice de perception de la profondeur par la disparité est très peu utilisé dans cet espace éloigné<sup>1</sup>, les déformations produites par ces disparités, bien que faibles, seront probablement peu perçues.

Figure 8

Figure 8 : Représentation schématique de la définition de l'angle pantoscopique : Positionnement du verre gauche devant l'œil, vue de profil.



Ainsi pour un même couple de verres, les disparités horizontales comme verticales sont plus importantes quand on regarde à proximité et moins importantes quand on regarde au loin. En d'autres termes, la modification des disparités du champ visuel est plus importante en vision de près qu'en vision de

### L'angle pantoscopique

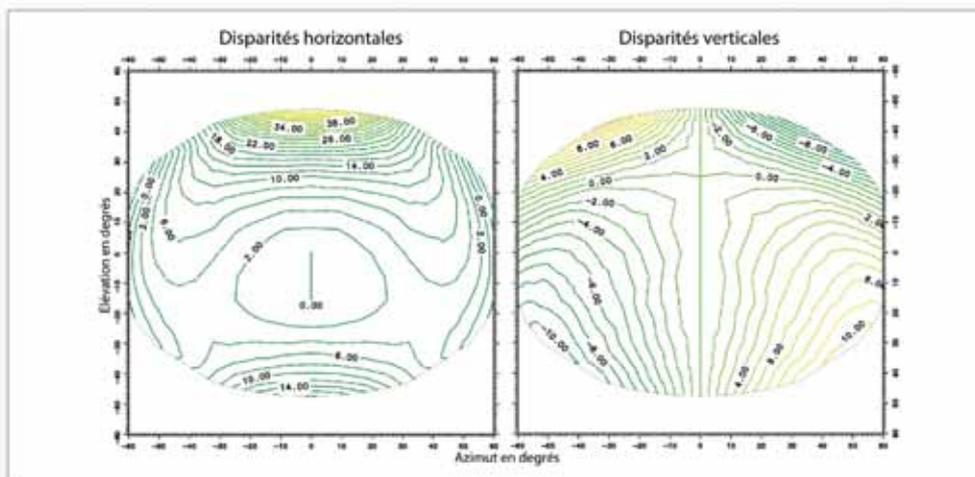
L'angle pantoscopique correspond à une inclinaison du plan des verres par rapport à un axe horizontal, généralement l'inclinaison est telle que la partie supérieure du plan des verres s'incline vers l'avant (Figure 8).

Entre un angle pantoscopique nul (verres dans un plan frontal) et un angle pantoscopique de 15°, les lignes d'iso-disparité horizontale se décalent globalement vers le bas (Figure 9). Le point de fixation ayant toujours une disparité nulle, on observe une petite zone, étendue jusqu'à environ 15° vers le bas, de disparité nulle. Pour les cartes d'iso-disparité verticale,

on observe un « étirement » des lignes d'iso-disparité verticale vers le haut. Les valeurs maximales dans une même fenêtre visuelle sont les mêmes mais la ligne de zéro disparité est déplacée vers le haut entraînant un espacement des lignes d'iso-disparité au-dessous et un resserrement des lignes au-dessus (cf. [figure 9](#)).

Figure 9

Figure 9 : Cartes d'iso-disparités horizontales (à gauche) et verticales (à droite) pour un couple de verres de +2,00 δ placé devant les yeux selon un angle pantoscopique de 15°.



Le resserrement des lignes d'iso-disparité, horizontale comme verticale, dans la partie supérieure du champ visuel, pourrait entraîner des déformations : la concavité/convexité, qui pourrait être perçue avec les mêmes verres placés dans le plan frontal, sera dans ce cas accentuée dans la partie supérieure du champ visuel. Néanmoins, il faut mentionner que cette augmentation plus rapide des disparités vers le haut ne commence réellement qu'à partir de 20-25° d'excentricité. Or, dans la vie courante, les éléments présentant le plus d'intérêt, quand les axes visuels sont alignés sur le méridien horizontal des verres, se situent plutôt au centre du champ visuel ou dans l'hémichamp inférieur. Dans les zones centrale et inférieure, les déformations seront moins importantes car les disparités sont plus faibles et augmentent moins vite qu'avec des verres d'angle pantoscopique nul.

#### Le décentrement horizontal

Les décentrement testés sont volontairement importants : des décentrement horizontaux, bilatéraux de 3 mm pour chaque verre (soit 6 mm au total), sont appliqués, en nasal ou en temporal conjointement. Pour les disparités horizontales, un décentrement

bilatéral de 3 mm en nasal provoque un resserrement des lignes d'iso-disparité vers le centre. Pour les zones latérales droite et gauche, ce resserrement des lignes d'iso-disparité horizontale met en évidence des disparités de signe opposé à la zone centrale et augmentant relativement rapidement à partir de 40° d'excentricité ([Figure 10](#), carte supérieure gauche). Le même décentrement bilatéral temporal va produire un rapprochement vers le centre des lignes d'iso-disparité latérales droites et gauches avec une augmentation plus importante des disparités, alors que les lignes d'iso-disparité supérieures et inférieures vont plutôt s'éloigner vers la périphérie ([Figure 10](#), carte supérieure droite). Pour les disparités verticales, le décentrement nasal entraîne un resserrement concentrique des lignes d'iso-disparité ([Figure 10](#), carte inférieure gauche), équivalent à ce que l'on observe quand on augmente la puissance (passage de +2,00 δ à +4,00 δ dans le présent exemple). Par contre, le décentrement temporal produit un écartement des lignes d'iso-disparité verticale, avec même un changement de signe des disparités verticales, observable à partir de 2 mm de décentrement ([Figure 10](#), carte inférieure droite). ▶

Par conséquent, un inconfort pourrait être ressenti par le porteur essentiellement sur les côtés droit et gauche du champ visuel binoculaire pour un décentrement bilatéral temporal, mais également dans les parties supérieures et inférieures du champ visuel pour un décentrement bilatéral nasal. Les disparités horizontales et verticales risquent d'entraîner des modifications de la perception de la profondeur différentes selon le décentrement appliqué : le décentrement nasal, pour un couple de verres convexes, produirait, par les

disparités horizontales, une perception vers l'arrière dans les champs périphériques latéraux droit et gauche, par opposition à la perception vers l'avant sur  $\pm 40^\circ$  autour du méridien vertical ; par contre, les disparités verticales indiqueraient une perception vers l'avant dans tout le champ, entraînant un conflit de perception dans les champs périphériques droit et gauche ; pour le décentrement temporal de 3 mm, le relief est vers l'avant pour les disparités horizontales, mais vers l'arrière pour les disparités verticales, de faibles amplitudes, ainsi les disparités horizontales et verticales sont en conflit sur tout le champ visuel. Ces conflits entre le sens de relief indiqué par les disparités horizontales

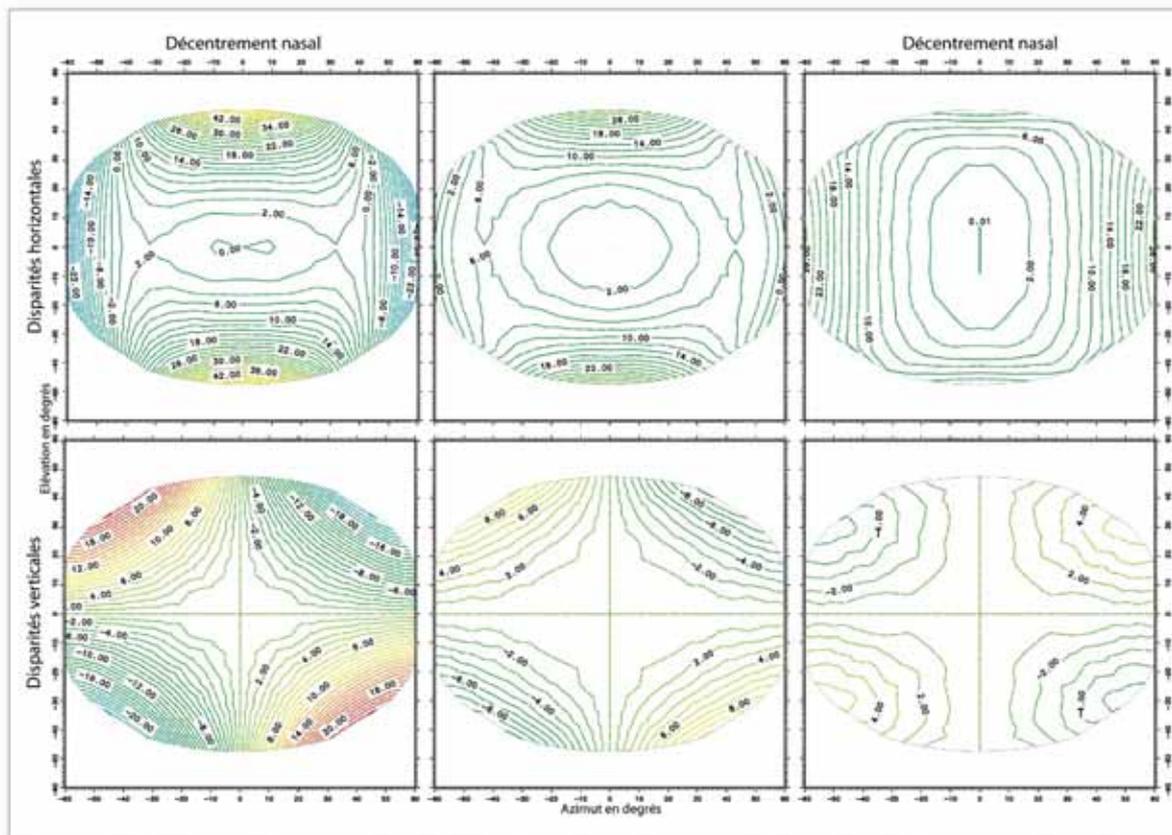


Figure 10

Figure 10 : Cartes d'iso-disparités horizontales (en haut) et verticales (en bas) pour un couple de verres de +2,00 D, décentrés de 3 mm en nasal pour les deux yeux (à gauche) ou de 3 mm en temporal pour les deux yeux (à droite), le couple de verres correctement centrés se trouvant au centre.

et celui indiqué par les disparités verticales peuvent créer des gênes pour le porteur présentant une erreur de centrage de ses verres ou nécessitant une prescription prismatique corrigée par décentrement des verres.

### La base

La base correspond à l'inverse du rayon de la face avant du verre :  $\frac{n-1}{R}$  où  $n$  est l'indice du verre et  $R$  le rayon de la face avant du verre. Plus la valeur de la base est élevée, plus le rayon est petit et plus la face avant est cambrée, et inversement. Une base théorique est calculée à partir des ellipses de Tscherning<sup>7</sup>, représentant graphiquement la relation entre la courbure de base, la puissance du verre et les aberrations (erreur de puissance et astigmatisme oblique) : pour chaque puissance de verre, une valeur de base (ou deux valeurs, et dans ce cas la base la plus plate sera privilégiée) permet de minimiser ces aberrations, il s'agit de la base théorique choisie en pratique. Pour les verres positifs ou convexes, la base théorique est plus grande que pour les verres négatifs, ou concaves. La base des verres a pour effet sur les disparités horizontales d'écarter les lignes d'iso-disparité vers les champs périphériques droit et gauche quand elle augmente et de les resserrer vers le centre (le point de fixation) quand elle diminue. Pour les disparités verticales, c'est l'inverse, les lignes d'iso-disparité s'écartent sensiblement avec la diminution de la base et se resserrent sensiblement avec l'augmentation de la base. La variation des disparités en fonction de la base est approximativement linéaire pour chaque point d'excentricité : la diminu-

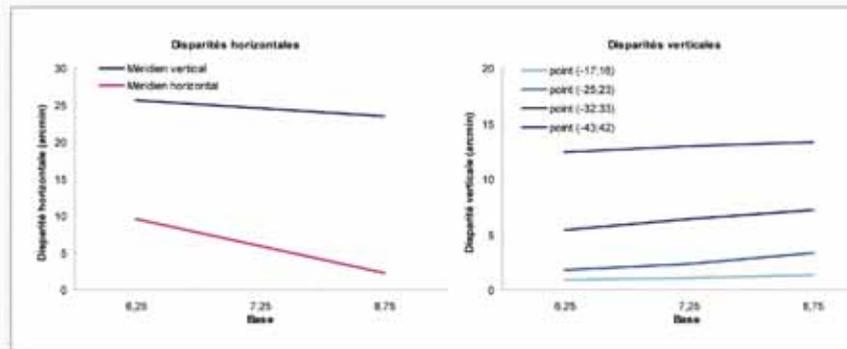


Figure 11

Figure 11 : Variation de la disparité horizontale (à gauche) et de la disparité verticale (à droite) en fonction de la base (7,25 étant la base théorique ; 6,25 une base plus plate et 8,75 une base plus cambrée), pour un couple de verres de +2,00D pour plusieurs points du champ visuel : pour les disparités horizontales, il s'agit de deux points à 43° d'excentricité sur le méridien horizontal (en rose) et sur le méridien vertical (en bleu) ; pour les disparités verticales, ce sont 4 points (dont les coordonnées sont en légende) d'un même quadrant...

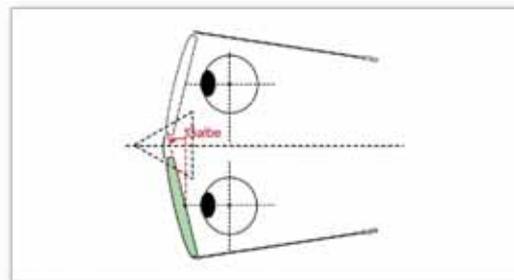
tion de la disparité horizontale avec l'augmentation de la base est faible pour les points du méridien vertical, par contre elle est plus rapide sur le méridien horizontal, au-delà de 20° d'excentricité (Figure 11) ; La disparité verticale augmente faiblement avec l'augmentation de la base. Ainsi, une base plus plate, donc plus petite, que la base théorique pour une puissance donnée augmente les disparités horizontales, et diminue légèrement les disparités verticales, et inversement pour une base plus cambrée (cf. Figure 11).

Pour minimiser les disparités horizontales, des verres de base plus cambrée seraient préférables, mais pour les disparités verticales ce seraient plutôt des verres de base plus plate. Ainsi la base théorique choisie semble un bon compromis entre les disparités horizontales et les disparités verticales. Néanmoins, il faut noter que les disparités verti-

cales sont faiblement influencées par la modification de la base, comparativement aux disparités horizontales autour du méridien horizontal. Aussi, un moyen de diminuer les disparités horizontales des champs latéraux droit et gauche, si celles-ci sont très importantes, pourra être de choisir une base plus petite modifiant finalement peu les disparités verticales, sans oublier que la modification de la base a finalement peu d'influence sur l'ensemble des disparités binoculaires. ▶

Figure 12

Figure 12 : Représentation schématique de la définition du galbe. Positionnement du verre gauche devant l'œil, vue de dessus.



**Le galbe**

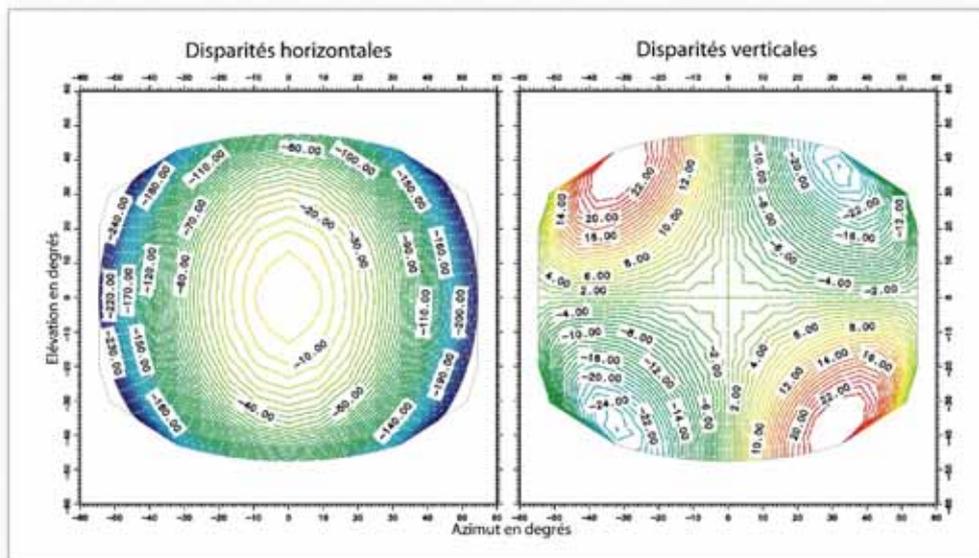
Le galbe d'un verre correspond à sa cambrure ou son orientation devant l'œil par rapport à un axe vertical (Figure 13). Habituellement le galbe des verres est faible, mais il est possible de l'augmenter de telle sorte que la partie temporale des verres soit en arrière par rapport à la partie nasale (cf. Figure 12).

Le fait d'augmenter le galbe modifie le signe des disparités horizontales (Figure 13). Par exemple pour des verres convexes (+2,00 δ) non galbés, les disparités horizontales sont globalement positives, alors qu'avec un galbe de 15° pour les deux verres, les disparités horizontales deviennent négatives et augmentent considérablement en valeur absolue.

plés de verres concaves. Ainsi, d'une part les valeurs de disparités très importantes et d'autre part les sens de relief contraires entre les disparités horizontales et les disparités verticales vont modifier la perception de la profondeur des porteurs par rapport à des verres non galbés. Les porteurs de verres très galbés risquent d'être très gênés, à cause des disparités horizontales qui leur indiqueraient un relief dans une direction (par exemple vers l'arrière pour un hypermétrope), quand les disparités verticales entraîneraient plutôt un relief de sens opposé (vers l'avant pour l'exemple de l'hypermétrope). Ce conflit entre la perception

**Figure 13**

Figure 13 : Cartes d'iso-disparités horizontales (à gauche) et verticales (à droite) pour un couple de verres de +2,00 δ avec un galbe de 15°.



Par contre, dans le cas des disparités verticales, leur signe dans chaque quadrant du champ visuel ne change pas, seules les valeurs absolues augmentent avec l'augmentation du galbe (cf. Figure 13).

Ainsi, le sens du relief induit par les disparités horizontales et les disparités verticales, qui est le même pour des verres non galbés, sera de signe opposé dans le cas des verres très cambrés : un couple de verres convexes (+2,00 δ par exemple), galbés, présente des disparités horizontales homonymes (négatives) donc de sens de relief en arrière alors que les disparités verticales indiquent un sens de relief en avant. On retrouve les résultats inverses pour les cou-

produite par les disparités horizontales et celle des disparités verticales peut être perturbant perceptivement, d'autant plus que les valeurs de disparités sont très supérieures aux verres non galbés.

**Les verres cylindriques**

Prenons l'exemple d'un couple de verres cylindriques de corrections :  
 OD : -2,00(+1,00)45° ;  
 OG : -2,00(+1,00)135°  
 Les axes sont perpendiculaires donc symétriques entre les deux yeux. Les disparités

horizontales augmentent de telle sorte que les lignes d'iso-disparité horizontale sont approximativement longitudinales joignant les extrémités gauche-droite du champ visuel (Figure 14) : l'augmentation des disparités est plus rapide en périphérie latérale droite et gauche, qu'au niveau du méridien vertical. Le long du méridien horizontal, la disparité est nulle. Il faut également ajouter que les disparités horizontales sont croisées dans le champ visuel

le champ visuel gauche et positif dans le champ visuel droit, ce qui donne, en terme de signe de relief, un relief vers l'arrière pour la partie supérieure du champ visuel et un relief vers l'avant pour la partie inférieure du champ visuel. Les disparités verticales sont donc de signe de relief opposé aux disparités horizontales (cf. figure 14).

Les disparités horizontales induisent donc une perception d'inclinaison, pour une surface, par

### L'anisométrie

Prenons l'exemple d'un couple de verres anisométriques : OD + 2,00 δ ; OG + 4,00 δ. Ces deux verres pris individuellement n'ont pas la même base théorique. Généralement, dans les cas d'anisométrie supérieure à 1,00 δ, une base commune pour les deux verres sera choisie, correspondant à la plus plate des bases théoriques de chaque verre : pour l'exemple d'anisométrie ci-dessus, il s'agit de la base du verre de +2,00 δ,

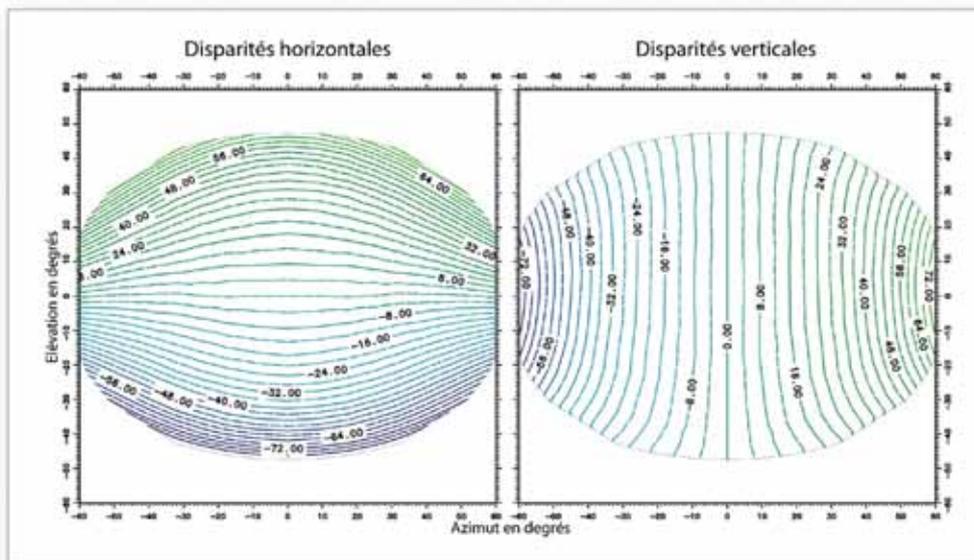


Figure 14

Figure 14 : Cartes d'iso-disparités horizontales (à gauche) et verticales (à droite) pour un couple de verres cylindriques de correction : OD = -2,00/+1,00/45° ; OG = -2,00/+1,00/135°

supérieur, et homonymes dans le champ visuel inférieur. Ainsi, par les disparités horizontales, la partie supérieure du champ visuel présentera un relief vers l'avant et la partie inférieure un relief vers l'arrière. Pour les disparités verticales, les lignes d'iso-disparité sont orientées verticalement et plutôt latitudinales : l'augmentation des disparités verticales se fait surtout horizontalement. Le signe des disparités verticales est négatif dans

rapport à un axe horizontal dans une direction, et les disparités verticales une perception d'inclinaison de sens opposé. Ainsi les disparités horizontales sont en conflit avec les disparités verticales au niveau de la perception de relief.

soit une base de 7,25 (Figure 15). Quelle que soit la base choisie pour les deux verres, les disparités horizontales augmentent horizontalement, les lignes d'iso-disparité sont longitudinales de haut en bas. Pour cet exemple, les disparités horizontales sont croisées dans la partie droite du champ visuel (relief vers l'avant) et homonymes dans la partie gauche (relief vers l'arrière). Les disparités verticales varient verticalement selon des ►

lignes d'iso-disparité latitudinales droite-gauche (cf. figure 15).

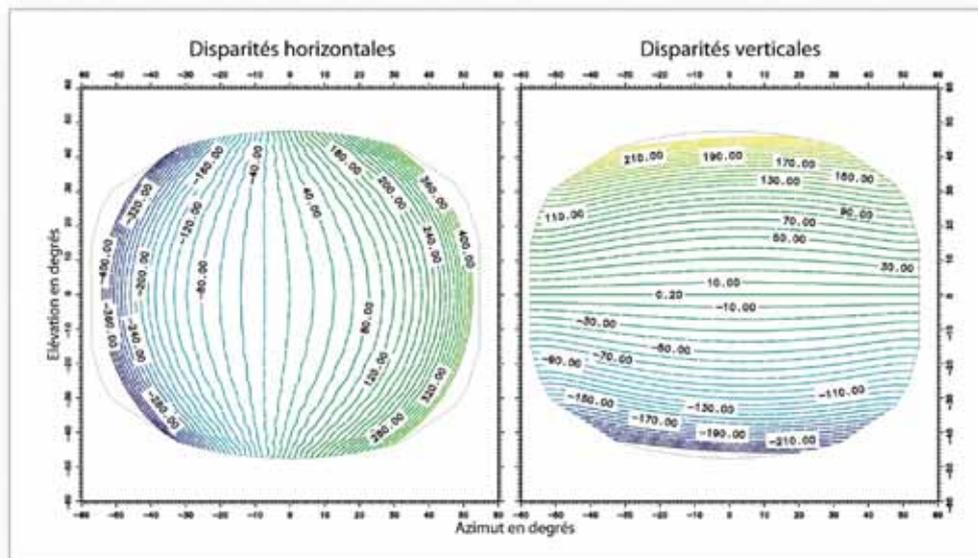
Pour les disparités horizontales comme verticales, les lignes d'iso-disparité sont légèrement resserrées du côté du verre de plus forte puissance (ici le côté gauche du champ visuel correspond au verre de +4,00 δ). Dans cet exemple, les disparités verticales sont de signe positif dans le champ visuel supérieur et de signe négatif dans le champ visuel inférieur. Ainsi, le sens du relief, prévisible par le signe des disparités verticales, indique un relief vers l'arrière dans le champ visuel droit

les disparités horizontales et verticales. Notons que le choix de bases pour les deux verres influence peu la distribution relative des disparités : seule la valeur maximale des disparités horizontales ou verticales dans le champ visuel considéré va varier selon le choix des bases, et dans une très faible mesure.

Les observations cliniques soulignent que les patients anisométropes porteurs de correction en lunettes semblent présenter des symptômes tels que de l'asthénopie, des céphalées ou encore des nausées<sup>8</sup>, et dans certains cas (avec une fréquence de moins de 9 %) des déformations de l'espace visuel<sup>9</sup>. Ces symptômes peuvent en partie s'expliquer par la présence des disparités binoculaires décrites ci-dessus et en particulier par le conflit de perception entre les dis-

Figure 15

Figure 15 : Cartes d'iso-disparités horizontales (à gauche) et verticales (à droite) pour un couple de verres anisométropes de correction : OD = +2,00 ; OG = +4,00. Les deux



et vers l'avant dans le champ visuel gauche, c'est-à-dire l'inverse du relief produit par les disparités horizontales. D'autre part, les valeurs de disparités horizontales comme verticales sont beaucoup plus élevées que pour des couples de verres isométropes. Les disparités horizontales produiraient donc une perception de rotation d'une surface autour d'un axe vertical dans une direction, et les disparités verticales une perception de rotation dans la direction opposée. La correction par des lunettes des anisométropes crée donc un conflit dans la perception de profondeur entre

parités horizontales et les disparités verticales. De même, l'aniséikonie également rencontrée chez les porteurs anisométropes indique clairement la présence de disparités trop importantes pour être fusionnées. En effet, les disparités très importantes peuvent ne pas être fusionnées, mais, si elles le sont, entraînent des modifications importantes de la profondeur.

## Discussion

La modification de certains paramètres de montage, de fixation ou de choix des verres va modifier les disparités binoculaires dans le champ visuel : d'abord la puissance des verres est un paramètre important, les disparités sont globalement moins importantes pour les verres de puissance négative que les verres de puissance positive, pour la même puissance en valeur absolue. De même, pour diminuer légèrement les disparités horizontales dans le champ, il vaudra mieux augmenter la base, la diminuer entraînerait une augmentation des disparités. Néanmoins la modification de la base produira un conflit entre l'amélioration de la perception de la profondeur et l'esthétique des verres, obtenu avec la base de Tscherning, sachant que l'effet de la base sur les disparités est assez faible. On observe également que les décentrement possibles, causés par des erreurs de montage ou choisis dans le cas des prescriptions prismatiques, modifient sensiblement les disparités et pourront donc se traduire par une gêne visuelle du porteur percevant des déformations plus importantes dans ce cas. Enfin, de plus en plus de montures solaires sont très galbées, et lorsque l'on souhaitera adapter la correction du porteur à ce type de montage, on va également provoquer une augmentation conséquente des disparités binoculaires, source de modification importante de la perception de la profondeur. Ces modifications peuvent être d'autant plus perturbantes pour le porteur que les disparités horizontales et verticales se trouvent en conflit pour le sens du relief produit. Enfin, les prescriptions particulières des porteurs (astigmatisme, anisométrie) peuvent également créer un conflit entre le relief produit par les disparités horizontales et le relief produit par les disparités verticales. En particulier, l'anisométrie crée de fortes disparités horizontales et verticales, de signe de relief opposé, qui peuvent expliquer les difficultés rencontrées par les porteurs anisométriques.

Dans la littérature, des seuils de stéréoaucuité en fonction de l'azimut ont été mesurés, mettant en évidence une diminution de la sensibilité aux disparités horizontales avec l'excentricité<sup>10</sup>. Les seuils d'acuité stéréoscopique mesurés sont d'environ 3,2 arcmin à 6° et 5,8 arcmin à 8°. Ces valeurs sont supérieures aux valeurs calculées dans la plupart des cas décrits dans la présente analyse aux excentricités équivalentes, à l'exception essentiellement de l'exemple d'anisométrie. La plupart des disparités horizontales induites par les verres ophtalmiques, pour les corrections les plus courantes, semble finalement ne pas modifier de façon importante la perception de la profondeur. D'autre part, dans l'espace personnel, les disparités binoculaires servent essentiellement à apprécier les distances des objets accessibles par les mains, elles sont donc particulièrement utilisées pour la préhension d'objets par exemple. Le port de lunettes, introduisant des modifications des disparités dans le champ visuel, modifie donc l'appréciation de la distance de l'objet avant l'initiation du mouvement pour l'attraper. L'erreur d'appréciation de distance serait perceptible si l'individu fermait les yeux pendant le mouvement de son bras et de sa main. Or, la plupart du temps, l'individu garde ses yeux ouverts pendant le déplacement de son bras, ce qui lui permet d'analyser en direct les disparités de sa main par rapport à celle de l'objet, tout au long de sa trajectoire. Ce traitement à chaque instant, par le cerveau, permet à l'individu d'atteindre sa cible sans se tromper. ►

## Conclusion

En conclusion, les couples de verres optalmiques introduisent des disparités binoculaires, horizontales et verticales, qui viennent s'ajouter aux disparités existant naturellement dans les scènes visuelles. Des situations assez fréquentes, telles que les for-

tes corrections myopiques ou hypermétropiques, les astigmatismes ou les anisométries, vont engendrer encore plus de disparités. Dans la plupart des cas, le porteur s'habitue très bien aux déformations produites par les verres, ou bien le porteur adaptera son comportement visuel ou sa posture afin de réduire les déformations gênantes, dues aux disparités. Il est important de ne pas perdre de vue que le système nerveux, qui traite les images disparates provenant des deux rétines, est capable de compenser des déformations importantes permettant une adaptation quasi-instantanée du porteur à ses lunettes de vue. Dans tous les cas, le centrage des verres est très important puisque quelques millimètres augmentent ces disparités pouvant modifier la perception de la profondeur. Par conséquent, les prises de mesures et ensuite le centrage des verres sont primordiaux lors de la réalisation d'un équipement en lunettes. ■

### À propos de l'auteure



#### Céline Devisme

Diplôme d'Etat d'Orthoptie (Université Paris VI, 1999) ; BTSOL (IUP Vision – St-Étienne, 2001) ; MST Optique Physiologique, Optique de Contact et Optométrie (Université Paris XI - Orsay, 2003) ; DEA Sciences Cognitives (Université Paris VI 2004).

Actuellement ingénieur d'étude dans le service Vision, R&D Optique – Essilor, et 3<sup>e</sup> année de thèse au Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action, Collège de France. Sujet de thèse : perception de la profondeur et du relief par les disparités binoculaires.

### Références

**1 Cutting J.E., Vishton P.M. [1995].**

Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth.

Perception of Space and motion, W. Epstein and S. Rogers ed., San Diego, CA: Academic Press, Chap.3, 69-117.

**2 Bourdy, C. [1989].**

Reconstruction et interprétation 3D en vision binoculaire humaine. Traitement de « l'information disparité ».

Journal of Optics, 20, 243-258.

**3 Collewijn H., Steiman R.M., Erkelens C.J., Regan D. [1991].**

Binocular fusion, stereopsis and stereoacuity with a moving head, Chap.7.

Vision and visual dysfunction, Vol.9, Ed. D. Regan, Macmillan, London.

**4 Howard J.P., Rogers B.J. [2002].**

Classification of binocular disparity, Chap. 20.

Seeing in Depth, Vol.2 Depth Perception, I Porteous, University of Toronto Press, Toronto.

**5 Ogle, K.N. [1950].**

The induced Effect, Chap.19.

Research in Binocular Vision, Press of W.B. Saunders Company, Philadelphia and London.

**6 Matthews N., Meng X., Xu P., Qian N. [2003].**

A physiological theory of depth perception from vertical disparity.

Vision Research, 43, 85-99.

**7 Tscherning M. [1904].**

Verres de lunettes.

Encyclopédie Française d'ophtalmologie, Vol. 3, Ed. Lagrange F. et Valude E., Paris : Octave Doin.

**8 Borish I.M., Benjamin W.J. [1998].**

Patients with anisometropia and aniseikonia, Chap.29, Section 5.

Clinical Refraction, Ed. W. J. Benjamin, Press of W. B. Saunders Company, Philadelphia and London.

**9 Minichiello A.B [1991].**

Mesure de l'anisétropie à l'aide de deux buprismes.

Acta Strabologica. Proc. Internat. Symp. Strabismus and amblyopia. CERES, Paris.

**10 Rawlings S.C., Shipley T. [1969].**

Stereoscopic acuity and horizontal angular distance from fixation.

Journal of the Optical Society of America, 59, 991-993.

## **IV Les disparités binoculaires des verres unifocaux**

Les disparités binoculaires introduites par les verres ophtalmiques unifocaux, que nous avons calculées et décrites dans l'article du paragraphe précédent, sont des disparités dites ajoutées. Les disparités sont ajoutées par les verres aux disparités réellement présentes dans une scène naturelle. Notre scène naturelle était une grille positionnée dans un plan front-parallèle. Cette grille présente naturellement des disparités (cf. Chapitre 1), en dehors du méridien vertical passant par le point de fixation, elles ne sont pas incluses dans les disparités ajoutées. L'étude des différents patterns caractéristiques de disparités binoculaires introduites par des verres ophtalmiques permet à présent de souligner les points importants, nécessaires pour la suite de l'étude.

Le premier point concerne les disparités horizontales dans les cas de corrections sphériques isométriques, c'est-à-dire de verres purement sphériques et de puissances égales entre les deux yeux. Dans ce cas, la répartition des disparités horizontales montre des variations relativement concentriques. Ces variations ne sont pas exactement linéaires (figure 7 de l'article), mais elles sont continues, croissantes et non monotones, en fonction de l'excentricité. Les disparités horizontales introduites par les verres ophtalmiques en général ne sont pas discontinues. Notons néanmoins que parmi les verres ophtalmiques, les verres bifocaux, appelés couramment « double-foyers », présentent des discontinuités dans les variations de la disparité horizontale, au niveau des bords du segment de vision de près : les verres bifocaux sont réalisés à partir d'un verre unifocal sur une partie duquel on ajoute un autre verre unifocal sous forme de pastille. La discontinuité de disparité s'explique par la différence de puissance entre le segment utilisé pour corriger la vision de près et le reste du verre corrigeant la vision de loin. Ce type de verre est utilisé pour corriger la presbytie. De plus, pour les verres sphériques de même puissance, les disparités horizontales dans la plupart des cas augmentent avec l'excentricité. Les verres convexes produisent des disparités horizontales positives dans le champ binoculaire, et les verres concaves des disparités négatives. Les porteurs hypermétropes purs pourront donc percevoir des déformations concaves de l'espace visuel et les porteurs myopes purs des déformations convexes. Notons qu'à puissance égale, les verres convexes introduisent des valeurs de disparité horizontale plus élevées que les verres concaves, donc les disparités croisées sont plus importantes que les disparités homonymes (figure 6 de l'article). Notons que, à valeur absolue égale, les disparités croisées indiquent une profondeur physique moindre par rapport aux disparités homonymes (cf. Annexe 2). Pour les couples de verres de  $\pm 2,00$  dioptries, sur un disque d'environ  $20^\circ$  de rayon centré sur le point de fixation, les différences selon le signe de la disparité horizontale semblent correspondre à des distances physiques, par rapport au plan de fixation relativement proches.

Le second point porte sur les disparités verticales. Elles sont généralement faibles au centre du champ visuel, et augmentent avec l'excentricité, comme c'est le cas des disparités existant naturellement dans l'espace visuel. L'action « constructive » des disparités verticales a lieu principalement pour des larges stimuli, générant par ce fait des valeurs plus importantes de disparité verticale (Rogers et Bradshaw, 1993 ; Kaneko et Howard, 1997). Cette répartition leur permet peut-être d'être plus facilement supportées. Les disparités verticales sont généralement nulles dans les méridiens horizontal et/ou vertical passant par le point de fixation. D'autre part, leurs valeurs absolues sont plus faibles que celles des disparités horizontales : pour un couple de verres de  $-2,00 \delta$ , la valeur maximale en disparité horizontale est d'environ 17 minutes d'arc, alors qu'en disparité verticale, elle est de 5 minutes d'arc ; pour un couple de verres de  $+2,00 \delta$ , les disparités horizontales atteignent 33 minutes d'arc, et les disparités verticales 10 minutes d'arc. Enfin, pour les verres sphériques isométriques, le signe des disparités verticales, différent selon le quadrant, correspond en terme de sens de relief (direction avant/arrière par rapport au plan de fixation) aux disparités horizontales : par exemple, le signe des disparités horizontales d'un couple de verres de  $+2,00 \delta$  est positif sur l'ensemble du champ binoculaire, entraînant une perception de déformation du plan vers l'avant ; pour ce même couple de verres, les disparités verticales sont positives dans les quadrants supérieur-gauche et inférieur-droit et négatives dans les quadrants supérieur-droit et inférieur-gauche, signifiant un relief vers l'avant du plan de fixation. Le signe des disparités verticales correspond donc à celui des disparités horizontales (même s'ils ne sont forcément pas égaux).

Enfin, le troisième point important à soulever se réfère aux cas dits particuliers que sont les corrections des astigmatismes et des anisométries, de même que les corrections sphériques dont le galbe (la cambrure des verres) est important. Le point commun des disparités de ces trois types de corrections est que le signe des disparités verticales est opposé à celui des disparités horizontales : sur une même portion de l'espace visuel, quand les disparités horizontales produisent une déformation vers l'avant, les disparités verticales correspondent à une déformation vers l'arrière. Par ailleurs, la correction des anisométries ou le choix de verres galbés ont la particularité commune de produire des disparités horizontales et verticales de valeurs très élevées, jusqu'à 10 fois supérieures, pour des verres galbés par exemple, à celles des verres non galbés de même puissance,  $\pm 2,00$  dioptries. D'autre part, les verres cylindriques et les verres corrigeant les anisométries présentent des variations de la disparité horizontale de sorte qu'elle n'a pas toujours le même signe dans tout le champ visuel : elle peut être positive dans une moitié de champ et négative dans l'autre, ceci provoquant des déformations du plan, se rapprochant d'une rotation du plan par rapport à un axe situé dans le plan frontal (une inclinaison si l'axe est horizontal, une orientation si l'axe est vertical). Ce type de déformation, dans le cas d'une orientation par rapport à un axe vertical se rapproche de l'effet induit. Il s'agit de l'interprétation des signes de la disparité

verticale ajoutée, proposée par Matthews *et al.* (2003), pour expliquer l'effet induit (cf. Chapitre 1). Dans les deux cas, la correction des anisométries et la correction des astigmatismes, comme nous l'avons précisé plus haut, les disparités verticales vont suivre les différences de signe observées pour la disparité horizontale, impliquant parfois la présence de deux quadrants voisins de même signe.

Il est donc intéressant de constater que dans les cas simples, où les disparités ne sont pas très importantes, les deux composantes de la disparité sont cohérentes sur le sens de la déformation prédite par chacune d'entre elles. Par contre, quand les disparités deviennent importantes, les deux composantes, horizontale et verticale, sont en opposition de sens de la déformation prédite. La question qui se pose est de savoir si cette opposition est un conflit entre des indices de profondeur, que seraient indépendamment la disparité horizontale et la disparité verticale, ou bien si cette opposition permet justement de « minimiser » des disparités horizontales importantes par des disparités verticales judicieusement en opposition. Ce travail apportera des éléments de réponse dans le Chapitre 5.

Cette analyse a permis de mettre en évidence le caractère continu des disparités horizontales induites par les verres ophtalmiques. De plus, pour les verres sphériques, cette variation continue de la disparité horizontale dépend de l'excentricité dans le champ visuel. Enfin, les disparités verticales sont d'une part peu présentes en région centrale et plus en périphérie, et d'autre part leurs variations suivent à peu près les variations des disparités horizontales, seul leur signe peut être en accord ou en opposition avec les disparités horizontales. La variation des disparités verticales semble à première vue correspondre à la variation des disparités verticales qu'on observerait si les disparités horizontales et verticales correspondaient à la même forme tridimensionnelle. Les calculs montrent que ces deux variations conjointes ne correspondent pas précisément à la même forme tridimensionnelle, les disparités verticales devraient être généralement plus élevées pour une parfaite correspondance.

A partir de ces observations, il semble important d'avoir des données quantitatives en termes de seuils de détection d'une déformation de surface par un pattern continu de disparités horizontales. De plus, la compréhension du traitement des disparités horizontales et de la combinaison des disparités horizontales et verticales sur l'ensemble du champ visuel permettra de quantifier plus précisément les gênes possibles des porteurs de verres unifocaux.

## Chapitre 3. Méthodologie générale

Ce chapitre aborde les points méthodologiques communs à l'ensemble des travaux expérimentaux<sup>1</sup> qui seront présentés dans les chapitres suivants. Sont détaillés, dans un premier temps, le matériel utilisé pour le montage dichoptique, puis la validation du choix du stimulus. Ensuite est décrite la méthode utilisée pour la mesure des seuils de discrimination de relief. Pour terminer, quelques précisions seront données sur les observateurs qui ont participé aux expériences.

### ***I Description du matériel***

La création de disparités binoculaires nécessite un dispositif donnant deux images monoculaires indépendantes. Les deux images sont calculées l'une par rapport à l'autre pour obtenir la progression souhaitée des disparités.

#### **I.1 Le simulateur**

Le simulateur de disparités binoculaires est un système dichoptique, constitué d'un ordinateur, d'un projecteur et d'un écran, dont les caractéristiques sont les suivantes :

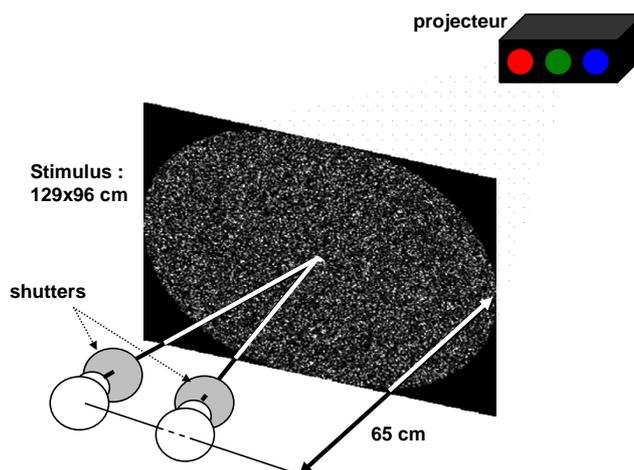
- L'ordinateur utilisé par le simulateur fonctionne sous le système d'exploitation Windows 2000, ou Windows XP pour les dernières expériences. La carte graphique permettant la stéréoscopie est la carte nVIDIA Quadro FX 4500.
- La résolution des images est de  $1600 \times 1200$  pixels, projetée sur une base de  $1290 \times 960$  mm, soit une résolution d'environ 0,8 mm et une résolution angulaire d'environ 4 minutes d'arc (4,2 minutes d'arc en central et inférieure à 4,2 minutes d'arc en périphérie ; cf. Annexe 4).
- Les images sont rétro-projetées sur un écran par un projecteur, de type ELECTROHOME MARQUEE ultra, en lumière monochromatique verte, pour une meilleure précision, un réglage plus précis : le réglage de trois canaux (projecteur tri-tube : rouge, vert et bleu) est plus difficile, l'alignement de ceux-ci devant être parfait pour une expérience en condition

---

<sup>1</sup> Les spécificités méthodologiques propres à chaque expérience seront décrites dans la partie *Matériel et Méthode* du chapitre présentant l'étude en question.

stéréoscopique, le choix d'un seul canal (le vert) résout le problème de l'alignement ; d'autre part, le canon vert est plus rapide, il est donc préférable pour la synchronisation temporelle des images de l'œil droit et de l'œil gauche. La vérification du réglage du canal vert, nécessaire régulièrement au cours du temps, est ainsi rendue plus aisée.

- Les images monoculaires sont présentées alternativement, par succession rapide de l'image correspondant à l'œil droit puis de celle de l'œil gauche. Ces deux images sont synchronisées avec deux shutters, montés sur des lunettes. Les shutters permettent à chaque œil de voir l'image qui lui correspond, par occultation alternée de l'autre œil pour ainsi former une image binoculaire. Le taux de rafraîchissement des images est de 100 Hz pour les deux yeux (soit 50 Hz par œil).
- La distance de l'écran est fixée à 650 mm donnant un champ horizontal de 89°, et un champ vertical de 73° (les lunettes ne limitent pas le champ).



**Figure 32 - Dispositif expérimental, constitué d'un projecteur utilisant le canal vert, d'un écran à 65 cm de l'observateur, de shutters placés devant les yeux de l'observateur et synchronisés avec le projecteur par un émetteur relié à l'ordinateur.**

*Remarque :* L'ordinateur, et en particulier le projecteur, produisent de la chaleur. Aussi est-il nécessaire de maintenir la pièce à une température ambiante stable d'environ 22°C (température optimale recommandée pour l'ordinateur, et inférieure à 35°C pour le projecteur). Il est également important qu'elle soit la même lors des réglages du projecteur et lors de son utilisation. La température est maintenue entre 20 et 24°C grâce à une ventilation qui, lors de l'expérience, sera éteinte (pour limiter le bruit, l'assèchement oculaire et le mouvement de l'écran).

## 1.2 Le contrôle de la fixation par électro-oculographie

La valeur des disparités présentées à l'observateur dépend du point fixé par les deux yeux. Dans notre cas, une convergence symétrique est nécessaire et doit être maintenue

pendant toute la durée de l'expérience pour garantir la précision des disparités introduites. Le contrôle de la fixation est donc important, et compte tenu du port de shutters sur lunettes pour l'expérience, les oculomètres à caméras ne peuvent pas être utilisés. Nous avons sélectionné la technique de l'électro-oculographie (EOG), qui présente l'avantage de pouvoir être utilisée avec les lunettes, pour l'ensemble des expériences. Le principe de la technique d'électro-oculographie repose sur le fait que le globe oculaire est une pseudo-sphère dont les parties antérieure (côté cornée) et postérieure (côté rétine) sont chargées positivement et négativement respectivement. La différence de potentiel entre les deux parties provoque un champ de potentiel autour de l'œil. Lorsque le globe oculaire se déplace dans l'orbite, ce potentiel varie et l'enregistrement de ces variations permet de mesurer le déplacement du globe. Le signal est recueilli par des électrodes placées en dérivation bipolaire. L'activité oculaire mesurée est décomposée selon deux axes, horizontal et vertical. Les électrodes, placées de part et d'autre de la tête au niveau de la commissure palpébrale, enregistrent les variations de potentiel traduisant les mouvements horizontaux des yeux. Les mouvements des yeux étant synchrones, les électrodes situées à gauche et à droite cumulent la différence de potentiel créée par les deux yeux. Pour les mouvements verticaux, les électrodes sont placées au-dessus et au-dessous de l'œil (droit ou gauche). Cette méthode est simple et ne nécessite que des électrodes et une pâte conductrice, la description du fonctionnement de l'appareil électronique se trouve en Annexe 5.

Le système d'EOG est calibré au préalable pour le centrage des yeux sur le point de fixation situé dans le plan de l'écran, à l'intersection du plan médian des deux yeux et du plan horizontal passant par les deux yeux. Le calibrage de l'appareil est fait à partir d'un cône de détection qui doit être suffisamment petit pour détecter les saccades mais pas trop petit pour ne pas détecter les micro-saccades (les mouvements dus aux clignements des paupières ne doivent pas non plus être détectés comme des saccades). Des essais préliminaires ont permis de déterminer une taille angulaire du cône de détection de  $\pm 6$  degrés d'excentricité par rapport au point de fixation. D'éventuelles recalibrations sont à prévoir en cours de test. Les électrodes cutanées sont placées sur l'observateur une dizaine de minutes avant le début de l'expérience pour permettre la stabilisation du signal. Néanmoins, des dérives du signal sont possibles en cours d'expérience, nécessitant une recalibration.

Il est demandé au sujet de fixer la cible de fixation pendant toute la durée de l'expérience. Il est rappelé au sujet que les électrodes de l'électro-oculographe sont là pour contrôler la fixation (cf. Annexe 6). Le déclenchement de l'EOG est indiqué par un signal sonore et entraîne l'annulation de la mesure de seuil en cours. La mesure annulée est répétée dans la suite de l'expérience. La détection d'une saccade, par le signal sonore et la répétition de la mesure, pouvait être suffisamment déplaisante pour dissuader l'observateur de reproduire un mouvement oculaire volontairement.

## **I.3 Description des images**

### **I.3.1 La cible de fixation**

Le point de fixation est un disque plein en lumière verte, de 1,56 degrés d'angle visuel, avec un point noir central, de 0,14 degré d'angle visuel. Il est vu binoculairement, il appartient aux deux images, celle de l'œil droit et celle de l'œil gauche. Le point de fixation est positionné au centre, horizontalement et verticalement du stimulus. L'observateur est placé de telle sorte que le point de fixation se trouve, dans le plan de l'écran, à l'intersection du plan médian de la tête et du plan horizontal passant par les deux yeux. Cette cible de fixation permet de maintenir la fusion (l'observateur ne doit pas voir la cible double) et l'accommodation sur l'écran de projection (le point noir central doit être vu net). Ce disque présente l'avantage d'être bien distinct pour l'observateur des autres éléments du stimulus (points clairsemés ou cercles, cf. Figure 36).

### **I.3.2 L'image de préfixation**

Une image de préfixation est nécessaire entre chaque mesure de seuil pour « effacer » les éventuelles post-images sur la rétine. Ainsi, une image noire avec le point de fixation « vert » est présentée pendant quatre secondes avant le commencement de la mesure avec l'affichage des images stéréoscopiques. Cet écran noir sert à se réadapter à l'obscurité ambiante. Pendant la présentation de cette image, les mouvements oculaires ne sont pas enregistrés, permettant à l'observateur de se reposer quelques secondes entre chaque mesure avant de reprendre et maintenir la fixation lors de la mesure.

### **I.3.3 Les disparités appliquées au stimulus**

Chaque image est précalculée à partir d'une image de 3000 × 2000 pixels et de manière à ce que les disparités introduites soient également réparties sur les deux yeux. Les disparités introduites sont horizontales dans tous les cas et peuvent être également verticales. Les calculs sur les disparités horizontales et verticales sont reportés en Annexe 7. La description du programme de calcul des images disparates, l'image de l'œil droit et celle de l'œil gauche, en fonction de la disparité binoculaire souhaitée en chaque point de l'image se trouvent en Annexe 8.

Le Chapitre 2 a mis en évidence la répartition continue et relativement concentrique des disparités horizontales introduites par des verres ophtalmiques unifocaux. Pour analyser ces variations de la disparité horizontale sur tout le champ visuel périphérique, les expériences psychophysiques ont cherché à s'en rapprocher en appliquant des patterns concentriques selon différentes excentricités. Ainsi, la variation de la disparité horizontale se fait de manière concentrique, entre un premier cercle d'excentricité  $a$  et un second cercle d'excentricité  $b$

(Figure 33). La valeur de la disparité dans la couronne périphérique est constante et égale à la valeur aux points d'excentricité  $b$ . Les deux cercles concentriques de rayon  $a$  (réduit à un point si  $a = 0$ ) et de rayon  $b$  constituent des discontinuités de gradient de disparité, encadrant un anneau de variation continue, concentrique de la disparité. La variation continue de disparité, ou gradient de disparité, correspond au rapport  $\frac{c}{b-a}$ , où  $c$  est la différence de disparité entre  $b$  et  $a$ . La disparité horizontale introduite peut être croisée ou homonyme (non croisée). La disparité introduite, appelée disparité ajoutée, correspond à la différence entre la disparité totale et la disparité du plan du stimulus (l'écran présente des disparités totales non nulles, cf. Chapitre 1 § II.2.1, mais une disparité ajoutée nulle). Le disque central, de disparité horizontale ajoutée nulle, se trouve dans le plan de l'écran et la périphérie sera en avant pour les disparités croisées ou en arrière du plan de l'écran pour les disparités homonymes.

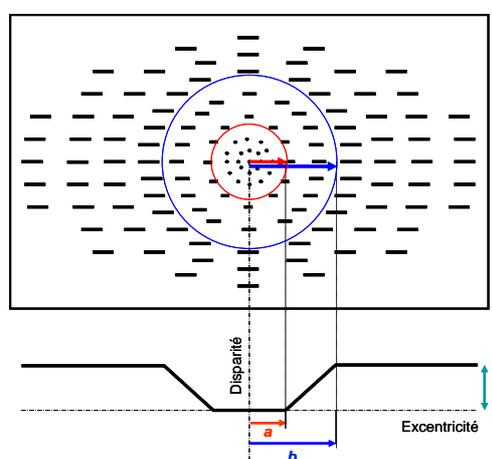


Figure 33 - répartition du gradient de disparité horizontale appliqué au stimulus (en haut). Le profil de variation de la disparité horizontale en fonction de l'excentricité (en bas), représentant également une coupe de la forme physique obtenue avec un gradient de disparité horizontale.  $a$  est l'excentricité de départ du gradient de disparité et  $b$  l'excentricité de fin de variation et  $c$  la différence de disparité entre  $b$  et  $a$ .

Des disparités verticales sont également introduites pour les expériences sur la combinaison des disparités horizontales et verticales. Leur répartition sera donc décrite dans le Chapitre 5.

Les images sont calculées pour chaque observateur, donc pour chaque écart inter-pupillaire. Rappelons que les valeurs de disparités calculées par le programme constituent la disparité introduite par rapport au plan de l'écran. Pour connaître la disparité totale de la nappe, il faut donc lui ajouter la disparité résultant de la planéité de l'écran (c'est-à-dire la différence par rapport au cercle de Vieth-Müller).

### I.3.4 Les conditions expérimentales

Pour adoucir les bords du stimulus, nous appliquons un détourage elliptique de l'image : de 1600 pixels de grand axe horizontal ; et 1200 pixels de petit axe vertical) (Figure

34 et Figure 35). De plus, l'expérience est réalisée dans le noir afin de ne pas avoir d'éléments environnants pouvant interférer dans le jugement de profondeur périphérique.

L'observateur est installé sur une mentonnière avec un appui frontal de telle sorte que ses yeux soient alignés verticalement avec le point de fixation. Une fois la tête placée au centre de la mentonnière, les yeux sont en convergence symétrique sur le point de fixation.

## **II Choix du stimulus**

### **II.1 Présentation des stimuli étudiés**

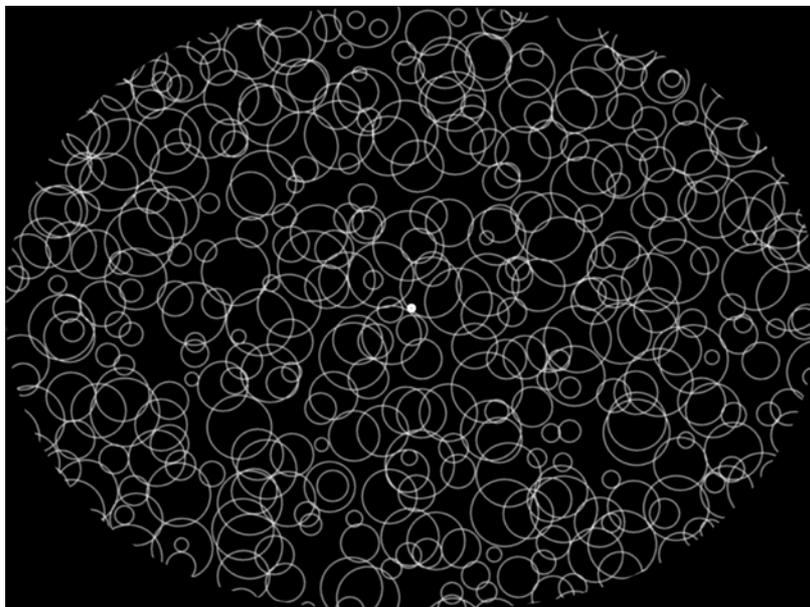
Le choix du stimulus est important pour les expériences stéréoscopiques, en particulier pour l'étude des disparités binoculaires comme indice de perception de la profondeur et du relief, quand cet indice doit être isolé. Le stimulus de choix d'après Julesz (1971) est un stéréogramme constitué de points, de lignes ou autre. Avec des stéréogrammes à points aléatoires (RDS), il est possible d'avoir une zone d'occultation monoculaire pour des grandes discontinuités de disparité (Howard et Rogers, 1995). Dans nos expériences, les variations de la disparité sont continues (gradient de disparité concentrique) et les discontinuités de disparités aux limites du gradient sont faibles. Cet indice « binoculaire », que constitue la zone d'occultation, n'est donc pas présent dans nos études.

La texture du stimulus peut influencer la capacité de l'observateur à interpréter l'information tridimensionnelle présentée. Thomas *et al.* (2002) ont mis en évidence des critères de sélection de textures non ambiguës pour des tests d'appréciation de profondeur par les disparités binoculaires, par exemple des critères en termes de contraste de luminance entre pixels voisins ( $> 3,6\%$ ). Zabulis et Backus (2004) ont testé une texture appelée « Starry night texture », ou texture ciel étoilé, qui serait totalement dépourvue d'indices de relief. Pour un test d'estimation d'inclinaison, leurs résultats montrent que la perception est la même avec ce stimulus ciel étoilé qu'avec un classique sparse Random Dot Stereogram (sRDS) pouvant donner une information de profondeur. Ainsi pour étudier l'influence de l'indice de disparité binoculaire, le sparse RDS reste le stimulus de choix. L'utilisation de sparse RDS se prête donc bien à la détection de déformation de surface induite par des disparités binoculaires.

Une première expérience de mesure de seuils de discrimination de déformation en profondeur d'un plan fronto-parallèle induite par des disparités horizontales a été réalisée avec un stimulus constitué de cercles répartis semi-aléatoirement (Chapitre 4). Au fur et à mesure des expériences, il nous a semblé que ce premier stimulus n'était peut-être pas complètement dépourvu d'indices de relief et présentait un contenu pas parfaitement uniforme. Ces observations nous ont permis d'améliorer le stimulus par l'utilisation d'un stéréogramme à points aléatoires clairsemés (sparse RDS). Ces deux stimuli sont des stéréogrammes cyclopéens sans direction privilégiée et permettant une perception continue de

la profondeur de l'image. Notons que ces deux stimuli, dans la terminologie de Van den Enden et Spekreijse (1989), ont un indice de perspective de la texture neutre.

Le premier stimulus a été utilisé pour la première expérience, décrite dans le Chapitre 4 (Devisme *et al.*, 2008). Il est composé de cercles évidés blancs sur fond noir avec une répartition semi-aléatoire (Figure 34).



**Figure 34 - stimulus initial constitué de cercles évidés répartis semi-aléatoirement avec détourage elliptique, avec un flou gaussien**

Un flou gaussien a été appliqué à l'ensemble de l'image pour éviter tout biais à la détection (scintillements lors des changements d'images dans les zones de variation de la disparité). Ce flou gaussien joue également un rôle d'anti-aliasing dans la méthode d'interpolation. La densité (rapport des pixels lumineux/pixels noirs) de cette image est de 36 %.

Les conditions d'affichage (résolution spatiale et mode de présentation) décrites dans l'article du Chapitre 4 ont nécessité une amélioration en vue de l'étude des disparités verticales : le passage d'un mode d'affichage entrelacé à un mode séquentiel. En effet, l'affichage entrelacé consiste en la décomposition verticale du stimulus permettant d'avoir l'image de l'œil droit sur une ligne horizontale de pixels et l'image de l'œil gauche sur la ligne de pixels suivante. Dans ce cas, la résolution verticale est divisée par deux, cette perte de résolution peut être réglée par un affichage séquentiel qui ne limite pas la résolution verticale, ne décomposant pas la même image en deux images droite et gauche. Ce changement de mode d'affichage a également entraîné une modification de la résolution de l'écran (de 1824 × 1368 pixels à 1600 × 1200 pixels). C'est pourquoi une nouvelle expérience a été mise en place dans les nouvelles conditions expérimentales en affichage séquentiel avec chacun des deux stimuli.

Le second stimulus (Figure 35), utilisé pour l'ensemble des expériences, est un « sparse » random dot stereogram, c'est-à-dire un stéréogramme à points aléatoires clairsemés : il est constitué de 50 000 points blancs uniformément distribués sur un fond noir, puis filtrés avec une demi-largeur de 5 pixels. Le filtre utilisé a un profil de la forme :  $\frac{1 + \cos(\pi \times x/2)}{2}$ , qui est une assez bonne approximation d'une gaussienne de rayon 2.5 pixels. La densité de cette image est de 47 %.

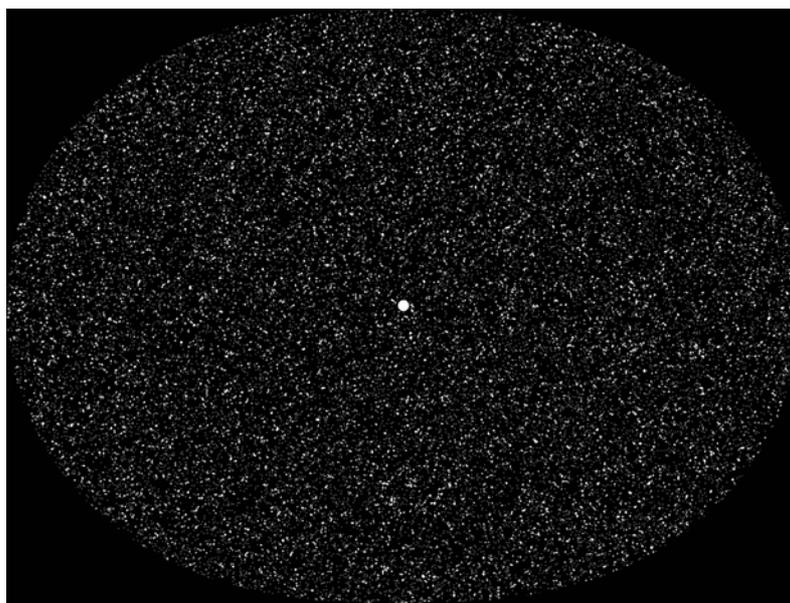


Figure 35 - stimulus sparse RDS avec détournage elliptique

## II.2 Comparaison des deux stimuli

Une expérience contrôle de mesure de seuils de discrimination de relief par une méthode d'ajustement ascendant (décrite dans le paragraphe suivant), a été conduite chez cinq observateurs, avec chacun des deux stimuli (présentés ci-dessus) dans les mêmes conditions expérimentales (Devisme *et al.*, 2005). Le protocole est celui que nous avons défini dans le présent chapitre, introduisant uniquement des disparités horizontales selon un gradient concentrique de disparité entre deux excentricités. Plusieurs excentricités sont testées, et le seuil de discrimination est mesuré en gradient de disparité, pour des disparités croisées et homonymes.

Des différences ont été observées entre les seuils obtenus avec les deux stimuli, mais elles proviennent essentiellement d'un biais d'un observateur. En effet, les seuils suivent des variations semblables en fonction des paramètres de localisation du gradient de disparité dans le champ visuel (ANOVA  $_{stimulus*d}$  :  $F_{2,35} = 1,88$  ;  $p = 0,17^2$ ). Les deux seules différences sont

---

<sup>2</sup> ANOVA répétée : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue; facteurs intra : stimulus, session et répétition ; variables catégorielles : observateurs, type de disparité, excentricité de départ (a) et largeur angulaire de la zone disparate (d).

observées d'une part pour les disparités homonymes introduites à partir d'une excentricité de  $14^\circ$ , pour lesquelles les seuils sont significativement différents entre les deux stimuli (test post-hoc :  $p < 0,02^3$ ). Mais il est important de préciser que cette différence est causée par un seul observateur (CH), on ne la considère donc pas comme significative. D'autre part, pour les gradients de disparité croisée introduits dans le disque central sur  $7^\circ$  de rayon (couple d'excentricités  $a = 0^\circ$  et  $b = 7^\circ$ ), les seuils sont également différents entre les deux stimuli avec des seuils supérieurs avec le stimulus sparse RDS (test post-hoc :  $p = 0,025^3$ ). Une explication possible pour cette différence de résultats est que dans la zone centrale, les deux stimuli ne présenteraient pas le même contenu d'information : le sparse RDS (Figure 36, à gauche) remplit uniformément l'espace dans la zone de  $7^\circ$  de rayon, alors que le stimulus contenant les cercles (Figure 36, à droite) présente une information moins régulièrement répartie. Le manque d'information dans la zone centrale pour les cercles aléatoires explique assez bien l'observation de seuils plus importants des gradients de disparité, par manque d'éléments mettant en évidence ce gradient.

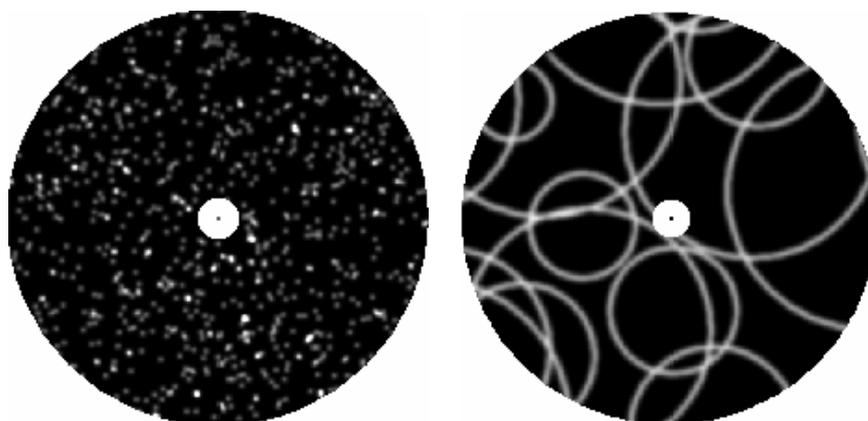


Figure 36 - zone centrale des stimuli, sparse RDS (à droite) et cercles aléatoires (à gauche), de rayon  $7^\circ$ .

Le changement de stimulus ne modifie donc pas considérablement les résultats, en termes de seuils de discrimination de déformation d'un plan fronto-parallèle (déformation convexe ou concave), pour les variations de disparité excentrées. Notons que ce sont les variations de disparités appliquées en champ visuel périphérique qui nous intéressent par la suite. On peut même ajouter qu'il s'agit d'une amélioration du stimulus, puisque le contenu uniforme du sparse RDS apporte une information supplémentaire dans des zones (comme la zone fovéale) où l'absence de régularité des cercles pouvait biaiser les résultats. Cette expérience montre donc que le stimulus, s'il s'agit d'un stéréogramme cyclopéen, ne modifie pas les résultats en termes de variation des gradients aux seuils de discrimination d'une déformation, concave ou convexe, d'un plan fronto-parallèle, dans le champ visuel périphérique. Le sparse RDS semble néanmoins meilleur en termes de contenu d'information.

---

<sup>3</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effets : type de disparité, stimulus, excentricité de départ (a), largeur angulaire (d).

Aussi le stimulus retenu pour l'ensemble des expériences est le sparse RDS, ou stéréogramme à points aléatoires clairsemés (Figure 35).

### III Méthode de mesure des seuils de discrimination de relief

#### III.1 Méthode psychophysique

Nous avons choisi une *méthode d'ajustement ascendant avec choix forcé*, pour laquelle le sujet n'ajuste pas précisément lui-même, mais il déclenche l'arrêt de l'incrémentement quand il perçoit la modification de profondeur (quand le sujet ajuste lui-même, il peut influencer l'expérimentation). Il s'agit plus exactement d'une méthode intermédiaire entre une méthode d'ajustement ascendant et une méthode des limites ascendantes. La méthode d'ajustement ascendant donne généralement des seuils plus élevés qu'une méthode de choix forcé, à cause de l'introduction progressive des disparités. Le choix de cette méthode réside dans le fait qu'elle permet de collecter un grand nombre de données rapidement. D'autre part, cette méthode se rapproche plus de conditions naturelles où les disparités sont rarement modifiées brutalement (comme sont présentées les disparités avec une méthode de choix forcé) et le but de ces expériences est essentiellement de voir l'influence de différents paramètres sur les seuils. Un choix forcé est utilisé après l'ajustement ascendant pour contrôler le sens de la déformation perçue par l'observateur (concave ou convexe) en fonction des disparités introduites.

#### III.2 Déroulement du test

Chaque mesure commence par l'écran de préfixation (l'image noire avec le point de fixation, cf. § I.3.2) présenté pendant quatre secondes, à la suite desquelles apparaît le stimulus d'abord sans disparité pour la première image. Le stimulus est progressivement « déformé » par l'introduction de disparités jusqu'à ce que l'observateur perçoive cette déformation du plan de l'écran. L'incrémentement pour la variation de la disparité est de trois images par seconde (Figure 37).

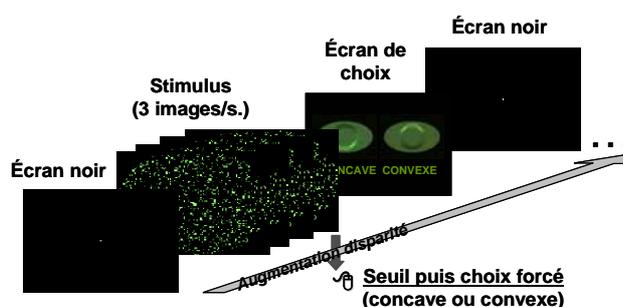


Figure 37 - déroulement de l'expérience.

L'observateur indique par un clic du bouton gauche de la souris qu'il perçoit un changement de profondeur par rapport au plan de l'écran (perception d'une partie du stimulus dans un autre plan que celui de l'écran, en avant ou en arrière de l'écran). L'observateur a pour tâche de dire : (1) quand il perçoit une déformation par un clic du bouton gauche de la souris, et (2) la forme de cette déformation, convexe ou concave (clic sur un des deux choix présentés dans un menu à l'écran). Les consignes données aux observateurs avant chaque expérience se trouvent en Annexe 6. L'observateur effectue une tâche de discrimination, indiquant par choix forcé si la déformation qu'il a perçue était concave ou convexe. Notons qu'une erreur dans la réponse sur la perception n'entraîne pas une nouvelle mesure de seuil, la valeur est toutefois supprimée lors de l'analyse. Le pourcentage d'erreur est environ de 1,7 %.

Il est important de prendre en compte le temps de réaction lié à la tâche demandée à l'observateur. Il s'agit du temps de réaction entre le moment où l'observateur perçoit la déformation et celui où il génère la réponse qui consiste en la réalisation de la tâche motrice suivante : avec son index, il appuie sur le bouton de la souris. Le temps de réaction pour une tâche de détection est environ de 250 ms, et celui d'une tâche de discrimination d'environ 300 ms (Donders, 1868). Dans notre cas, il s'agit d'une discrimination puisqu'il est demandé à l'observateur d'indiquer ensuite si la déformation était concave ou convexe. La déformation étant dans le champ visuel périphérique, ce temps de réaction se situe plutôt entre 400 et 600 ms (Wall *et al.*, 2002). Ainsi nous avons estimé ce temps à 400 – 500 ms. Compte tenu de la vitesse d'affichage de trois images par seconde, soit une image toutes les 333 ms environ, l'image enregistrée par le programme au seuil de détection est donc la deuxième image précédant le déclenchement par le clic de la souris.

Les mesures sont répétées plusieurs fois (6 à 9 fois selon le nombre de conditions expérimentales). L'expérience est répartie sur plusieurs séances qui ne doivent pas durer plus de 30 minutes, pour éviter la fatigue des observateurs qui peut modifier les seuils.

Pour terminer, nous avons fait un petit sondage auprès de l'observateur sur sa perception qualitative de profondeur.

#### **IV Les observateurs**

Les observateurs devaient satisfaire aux conditions suivantes :

- Pas de problème de vision binoculaire (strabisme, amblyopie, suppression...),
- Une vision normale ou corrigée à la normale par le port de lentille de contact. Des acuités visuelles supérieures ou égales à 10/10 à la distance de l'écran (650 mm),
- Une stéréoacuité au minimum de 15 à 30" d'arc, mesurée au test TNO.

Les observateurs qui ont accepté de participer aux expériences devaient lire attentivement un formulaire d'information et de consentement de participation (formulaire

type en Annexe 9), ce dernier devant être rempli et signé en deux exemplaires : un exemplaire que l'observateur conservait et le second pour l'expérimentateur.

Nous avons sélectionné dix observateurs sans correction, satisfaisant à ces critères. Trois observateurs (BD, CP et GG) étaient habitués aux expériences psychophysiques, les autres observateurs ne l'étaient pas. Les caractéristiques des dix observateurs (sexe, âge, écarts pupillaires, correction optique portée et stéréoaucuité) sont détaillées dans le Tableau 1. La mesure des écarts pupillaires est réalisée avec un pupillomètre à reflets cornéens (Essilor Digital CRP) paramétré pour une distance correspondant à celle de l'écran (65 cm). Les détails du calcul des écarts pupillaires vrais, c'est-à-dire dans le plan des pupilles se trouvent en Annexe 10, permettant d'obtenir la formule suivante :

$$EP = \frac{D \times EPm}{D - 15.5}$$

Où D est la distance de fixation (ou distance de l'écran) en mm ; EPm correspond à l'écart pupillaire mesuré avec le pupillomètre en mm ; 15,5 mm correspond à la distance entre le plan de mesure du pupillomètre et le plan des pupilles ; on obtient ainsi EP, la valeur de l'écart pupillaire dans le plan des pupilles, en mm.

Nom	Sexe	âge	EP à 650 mm (en mm)	correction optique portée	acuité stéréoscopique (TNO)
BD	M	35	67	aucune	15" d'arc
BR	M	25	61	aucune	15" d'arc
CH	F	28	56	aucune	30" d'arc difficile
CP	M	50	69	aucune	15" d'arc
EV	M	29	68	aucune	< 30" d'arc
GG	M	30	65	aucune	30" d'arc
MB	F	40	64	aucune	15" d'arc
ND	F	27	59	aucune	< 30" d'arc
SM	F	26	56	aucune	< 30" d'arc
TB	M	38	60	aucune	15" d'arc

**Tableau 1 - caractéristiques des observateurs :** sexe ; âge ; écart pupillaire dans le plan des pupilles pour une distance de 650 mm ; correction optique nécessaire pour la vision à 650 mm ; acuité stéréoscopique mesurée par le test stéréoscopique TNO, en seconde d'arc.

Les images stéréoscopiques présentées aux observateurs sont calculées pour chaque valeur d'écart pupillaire. Ainsi, la variation de gradient est la même pour tous les sujets. Les dix observateurs n'ont pas participé à toutes les expériences, les participants seront précisés dans la partie *Matériel et Méthode* du chapitre de chaque étude.

## **Chapitre 4. Le traitement des disparités horizontales sur l'ensemble du champ visuel**

Ce chapitre présente l'étude réalisée sur le traitement des disparités horizontales en champ visuel central et périphérique. Son objectif est de préciser le rôle d'un gradient de disparité horizontale sur la perception d'une déformation continue de surface, en fonction de la localisation de ce gradient dans le champ visuel. Les seuils de détection de déformation mesurés dépendent du gradient de disparité et de l'excentricité de départ. Les résultats montrent que le traitement des disparités horizontales dans la détection de déformations d'une surface semble dépendre de l'excentricité de la position des disparités, et qu'il serait plutôt global dans le champ visuel périphérique. La possible présence de post-effets de relief a été également suggérée suite au rapport verbal d'un observateur. Les post-effets de relief semblent influencer les valeurs de seuils selon le sens de la déformation de relief consécutif. Seront ensuite décrites deux expériences de contrôle visant à valider la méthode de mesure de seuil utilisée et les conditions expérimentales d'affichage. Enfin nous essaierons d'appliquer les résultats des expériences aux disparités horizontales introduites par des verres ophtalmiques.

### ***I L'étude de la disparité horizontale en fonction de l'excentricité***

#### **I.1 Introduction**

L'analyse des verres ophtalmiques unifocaux a mis en évidence l'aspect continu des variations des disparités horizontales introduites par ces verres (Chapitre 2). Ces disparités horizontales introduites sont plus importantes dans le champ visuel périphérique qu'autour du point de fixation. Mais une incertitude reste quant à la perception de déformation des surfaces par ces variations continues de la disparité à savoir si celles-ci sont suffisamment faibles pour ne pas modifier la perception du relief.

La présente expérience porte sur la capacité humaine à discriminer le sens d'une déformation en profondeur d'une surface plane en fonction du gradient de disparité placé à différentes excentricités. Peu d'auteurs se sont intéressés à la perception du relief et de la profondeur au-delà de la zone péri-fovéale. On sait que la sensibilité à la disparité horizontale diminue avec l'excentricité (Rawlings et Shipley, 1969) ; de même beaucoup d'études se sont

penchées sur la perception de plan fronto-parallèle, ou bien sur la position de l'horoptère (Ogle, 1950 ; Tyler, 1983 ; Bourdy, 1989 ; Tyler, 1991). Mais peu d'études se sont penchées sur les patterns de variation de la disparité horizontale, croisée ou homonyme qui entraînent la perception d'une surface non plane dans le champ visuel périphérique.

Les variations continues de la disparité horizontale dans tout le champ visuel semblent plus difficiles à percevoir en relief (McKee, 1983), nécessitant peut-être un plan de référence pour effectuer le jugement (Mitchison et McKee, 1990 ; Petrov et Glennerster, 2004 ; Glennerster et McKee, 2004 ; cf. Chapitre 1). Mais, la présence de discontinuités faciliterait la détection (Mitchison et Westheimer, 1984 ; Gillam, Flagg et Finlay, 1984 ; Rogers et Cagenello, 1989).

Le but de cette expérience est de définir le rôle de la disparité horizontale, croisée ou homonyme, dans la perception de déformations de surface plane sur un grand champ visuel. Les disparités horizontales sont introduites selon une variation en gradient concentrique de la disparité disposé entre deux excentricités. L'expérience consiste en la mesure de seuils de discrimination de déformations, concave ou convexe, de surface. Les résultats montrent des différences de seuils entre les disparités croisées et les disparités homonymes, ainsi que des différences de comportement entre la zone centrale et la zone périphérique. Après la présentation, sous forme d'article (Devisme *et al.*, 2008), de l'étude des disparités horizontales de variation continue dans le champ visuel, la discussion générale des résultats en fin de chapitre portera sur l'ensemble des expériences, originelle et contrôle, qui ont pu être réalisées sur le sujet, et en fera la synthèse.

## **1.2 Aspects méthodologiques**

Cette étude reprend essentiellement le protocole décrit dans le Chapitre 3 de méthodologie générale, néanmoins quelques précisions peuvent être apportées. Les disparités introduites sont uniquement horizontales et elles présentent une variation continue entre deux excentricités  $a$  et  $b$ . Les excentricités  $a$  et  $b$  sont variables et se situent entre  $0^\circ$  et  $35^\circ$  par pas de  $7^\circ$ . Plusieurs couples d'excentricités sont définis de telle sorte que les excentricités de départ ( $a$ ) peuvent être égales à  $0^\circ$ ,  $7^\circ$  ou  $14^\circ$ , et les excentricités de fin ( $b$ ) sont choisies afin d'obtenir trois valeurs possibles de largeur angulaire de la variation de disparité (correspondant à  $b - a$ ) qui soient  $7^\circ$ ,  $14^\circ$  ou  $21^\circ$ . Par combinaison des excentricités, on obtient neuf couples d'excentricité répondant à ces définitions, trois couples pour une même excentricité de départ, ou trois couples pour une même largeur angulaire ( $b - a$ ). Rappelons que la vitesse d'affichage du stimulus est de trois images par seconde. Les gradients de disparité horizontale sont introduits progressivement avec une vitesse de progression moyenne de 0,045 minute d'arc par degré par seconde pour les disparités croisées et en moyenne 0,039 minute d'arc par degré par seconde pour les disparités homonymes. La vitesse

de progression a été évaluée par une expérience préliminaire afin qu'un seuil moyen soit atteint environ en 30 secondes. Cette expérience préliminaire avait mis en évidence des différences de seuils entre les disparités croisées et homonymes.

La méthodologie de l'étude originelle est décrite dans l'article du paragraphe suivant, mais il faut mentionner que cette étude a été reproduite pour le changement de stimulus (étude décrite dans le Chapitre 3) (Devisme *et al.*, 2005). La même expérience a donc été réalisée avec le stimulus constitué de cercles aléatoires avec un affichage entrelacé, puis elle a été reproduite avec un affichage séquentiel pour ce stimulus et pour un stéréogramme à points aléatoires clairsemés (sparse RDS). La méthode psychophysique de mesure des seuils réalisée pour les deux expériences est la méthode d'ajustement ascendant combinée à une méthode des limites (déjà décrite dans le Chapitre 3).

### **1.3 Résultats et discussion**

L'article suivant, publié dans la revue *Vision Research* (Devisme *et al.*, 2008), présente les résultats des mesures de seuils de discrimination d'une déformation concave ou convexe du plan fronto-parallèle en termes de gradient de disparité, en fonction de l'excentricité. Les résultats sont analysés et discutés dans l'article. Une partie de ces résultats a également été publiée sous la forme d'un abstract (Devisme *et al.*, 2004).

## STEREOSCOPIC DEPTH PERCEPTION IN PERIPHERAL FIELD AND GLOBAL PROCESSING OF HORIZONTAL DISPARITY GRADIENT PATTERN

Céline Devisme<sup>a,b\*</sup>, Björn Drobe<sup>b</sup>, Annie Monot<sup>c</sup>, Jacques Droulez<sup>a</sup>

<sup>a</sup> LPPA, CNRS, Collège de France, Paris, France

<sup>b</sup> Vision science, R&D Optics, Essilor International, St Maur, France

<sup>c</sup> Equipe Vision, CRCDG, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, France

**ABSTRACT.** This study investigated how the visual system detects a surface deviation from planar, induced by, crossed or uncrossed, horizontal disparities continuously increasing with eccentricity. Binocular disparities increased linearly and concentrically, between two given eccentricities. The thresholds of deformation detection were gathered using a method in which observers halted a dynamic stimulus. The thresholds were substantially higher than those measured by the control experiment using a method of constant stimuli. Results, using the adjustment method, highlighted lower discrimination thresholds for uncrossed disparities than for crossed disparities. For all the directions of disparity, thresholds varied similarly as a function of eccentricity, however two observations could be pointed out: thresholds of peripheral start depended on disparity gradient and starting eccentricity; fovea start thresholds did not depend on disparity gradient alone. Data suggests that, in peripheral field, the visual system was more sensitive to uncrossed disparities than crossed disparities, relative to the frontoparallel plane. According to a verbal report from observers, the reference used for the perceptive judgment appears not to be the screen plane but rather the peripheral stimulus. Moreover, in the deformation detection of planar surfaces, horizontal disparities processing depends on the eccentric location of the disparities. It could be global for the peripheral locations and could be based more on depth contrast for the central locations.

**Key words:** horizontal disparity, surface perception, disparity gradient, perceived depth, eccentricity, deformation.

### INTRODUCTION

In the present study, we investigated the human ability to discriminate the sign of deviation from planar surface as a function of disparity gradient located at different eccentricities. Stereoscopic depth can be perceived beyond 30° of eccentricity, it is known that horizontal disparity sensitivity decreases with increasing eccentricity (Rawlings & Shipley, 1969) and with decreasing observation distance. Nevertheless, characteristics beyond the peri-foveal area were essentially studied for the perception of frontoparallel planes and to determine the position of the horopter as a

---

\* Corresponding author:

E-mail addresses: celine.devisme@college-de-france.fr, devismec@essilor.fr (C. Devisme).

function of various criteria: i.e. zero binocular disparity, zero deviation from equal perceived distance from the observer, or binocular fusion (Ogle, 1950; Tyler, 1983; Bourdy, 1989; Tyler, 1991). For the perception of frontoparallel planes behind or in front of the fixation point, Drobe and Monot (1997) found that apparent frontoparallel planes present curvatures depending on the relative distance in depth to the fixation point and these curvatures are similar to the ones observed for horopter shapes. The perception of planar surface and the conditions such that surfaces are perceived as planes were largely studied. However, little is known about patterns of crossed and uncrossed disparity variations that can elicit the perception of non planar surface in the peripheral visual field.

Continuous disparity variations such as horizontal gradients, applied to the whole figure, are poorly perceived in depth (McKee, 1983). The author's explanation was that continuous variations can constitute a powerful input for global fusion mechanism which would average disparities of different elements in order to obtain a mean depth value for the whole figure. Mitchison and McKee (1990) also explained this poor sensitivity to disparity gradients by the fact that depth is judged in relation to a reference plane. This observation was for gradients all along the figure, but is it true when the disparity gradients were concentrically or sinusoidally applied: gradients also occurred on the whole figure, but there is a central point or lines of null disparity, and then some kinds of disparity gradient discontinuity. Mitchison and Westheimer (1984) suggested that the visual system uses the salience to determine which points are coplanar (equal saliences) in a visual scene and to detect corners (discontinuity of disparity gradient) between planes. The authors introduced the concept of salience of a visual object, which is the sum of weighted disparity differences between a visual object and its neighbours, to account for the depth perception. The weighting would vary inversely with distance in the frontal plane, i.e. eccentricity. Therefore detection of disparity gradient discontinuity could probably be based on disparity differences and could depend on eccentricity.

In addition to the concept of salience, some authors have shown that large variations in horizontal disparities allow to detect edges or boundaries: The stereoscopic system processes edges of surfaces, or discontinuities of disparity, more quickly and more precisely than a constant disparity gradient applied to the whole surface (Gillam, Flagg & Finlay, 1984). Slanted or inclined planes are produced by disparity gradient, whereas extreme curvatures can be considered as edges or boundaries of surfaces. Rogers and Cagenello (1989) then found that the visual system is more precise and more sensitive to surface curvatures than to slanted surfaces. Lunn and Morgan (1997) reported that performance in slant discrimination does not improve with a discontinuity of disparity gradient. Nevertheless, the authors added that stereoscopic vision is more sensitive to relative disparity than to disparity gradient. With a horizontal disparity gradient concentrically applied on a disc or ring-shaped surface, Devisme, Monot, Drobe and Pédrone (2004) showed that detection thresholds of concave deformation (using crossed disparities) of a frontoparallel plane depended on the disparity gradient and on the eccentricity from which it is applied. Therefore, in this specific layout of disparity gradient, to detect depth deformation, the visual system could process the disparity gradient difference and not the disparity difference between the central point (or disc) and peripheral areas.

According to Mitchison and McKee (1990), to make relative depth judgement between several objects, the visual system would also need a reference. The presence of a reference plane affected depth increment thresholds and improved relative depth judgement (Glennerster & McKee, 1999; Andrews, Glennerster & Parker, 2001). The authors suggested that the visual system might construct a reference plane for comparing disparities. Therefore, the sensitivity of the human stereoscopic system has been shown to depend on the distance of points with respect to a local reference plane. This reference plane could be defined by distant points, it could be distinct from the fixation plane and it could be slanted (Glennerster, McKee & Birch, 2002; Petrov & Glennerster, 2004; Glennerster & McKee, 2004). This processing avoids rebuilding a complex 3D-space for

3

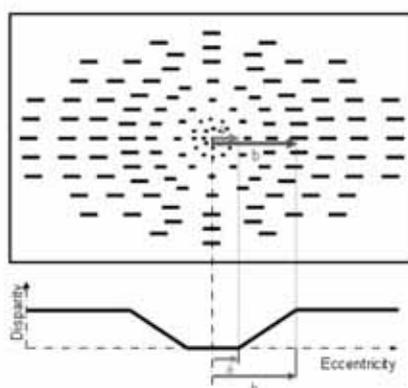
each eye- or head-movement, in eye-centric or head-centric coordinates. According to the work of Van den Enden and Spekreijse (1989), stereoscopic depth is also influenced by texture perspective. They showed that binocular depth reversal can be observed despite familiarity cues providing that the effect of texture perspective is neutralized. It could be said that the surface which is defined by the perspective cue can be considered as a reference surface for the processing of binocular disparity. Thus, disparity gradient applied to the whole field seems to be globally processed. Using the stimulus itself as the reference plane, the visual system would poorly detect constant disparity gradient.

The aim of the present study is to define the role of horizontal disparity in the perception of planar surface deviation over a large visual field, whatever the horizontal disparity direction is. In this experiment, we introduced horizontal disparity gradients (crossed and uncrossed disparity), between two eccentricities, in a frontoparallel plane, and measured the resulting detection thresholds of surface deformations (respectively convex and concave). The results showed difference in thresholds between crossed and uncrossed disparity in discrimination of surface deformation, and different behaviors between foveal and peripheral area.

## EXPERIMENT

**DESIGN AND PROCEDURE.** The method used to determine thresholds for surface deformation discrimination was an intermediate method between ascending limits and ascending adjustment: one measurement consisted of the successive presentation of images with increasing level of disparity gradient at a fixed location. The observer did not really adjust the level of disparity gradient at his threshold, but he stopped the unwinding of images, i.e. the disparity gradient increasing, when he detected a depth change (Figure 2). The method of ascending adjustment usually gives thresholds higher than forced choice method, because of the progressive introduction of disparities. The choice of this method was because it permitted to collect many results on a lot of data (the experimental conditions with 18 different measurements were described below) and because the aim of this study was to investigate the variation of the thresholds, as a function of different parameters. A forced choice method was also used to control if observers perceived deformation in the correct direction (concave or convex) related to the direction of the disparities.

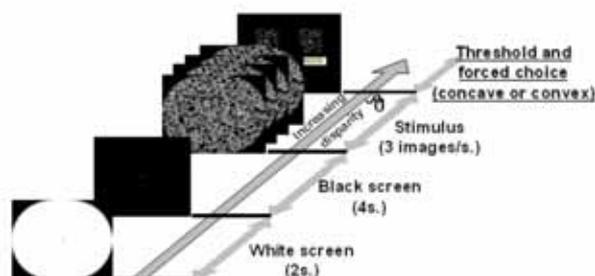
Binocular disparities were introduced by adding equal and opposite horizontal shifts locally to the image of each eye. Disparity was added to the frontoparallel plane, which already contains disparity. The frontoparallel screen plane is different from the horopter, and then it presents uncrossed disparities that increased with eccentricity. In the present experiment, null disparity meant points of the screen plane. The applied disparities increased concentrically between a first circle of eccentricity  $a$  and a second circle of eccentricity  $b$  (Figure 1) ( $a$  was called the eccentricity of the beginning of disparity variation, and  $b$  the eccentricity of the end of disparity variation). Eccentricity  $a$  values were: 0, 7 or 14° and eccentricity  $b$  values: 7, 14, 21, 28 and 35°. The nine tested pairs of eccentricity were: (0,7); (0,14); (0,21); (7,14); (7,21); (7,28); (14,21); (14,28); (14,35). Pairs ( $a,b$ ) were randomly presented. Disparity value in the peripheral zone (beyond eccentricity  $b$ ) was constant and equal to the value at the points on the circle of radius  $b$ . Therefore, disparity gradient discontinuities are induced on two concentric circles of radius  $a$  (reduced to a single point for  $a = 0$ ) and  $b$ , separating an annulus of constant concentric disparity variation. The disparity variation, or disparity gradient, corresponded to the ratio  $\frac{c}{b-a}$ , where  $c$  was the disparity difference between  $b$  and  $a$ . Disparity was set in the two directions, “crossed” (periphery in front of the screen) and “uncrossed” (periphery behind the screen).



**Figure 1:** Field of geometric horizontal disparities applied to stimulus (upper). Profile of horizontal disparity variation as a function of eccentricity (lower).  $a$  is the eccentricity of the beginning of the disparity gradient and  $b$  is the eccentricity of the end of the disparity gradient.

Observers were seated 65 cm away from the display and used a chin rest in order to stabilize head position throughout the experiment. They were instructed to maintain their fixation to the central point of the stimulus for all the measurement duration, and eye movements were monitored by electro-oculography. The experiment room was carefully darkened so that the observer saw nothing but the stimulus throughout the experiment. The fixation plane was only located by the fixation point.

Pre-fixation images were used between each measurement in order to avoid afterimages of the stimulus on the retina (Figure 2): a white elliptic image, with a black fixation point, presented two seconds, to erase some possible afterimages left on the retina, after the previous measurement, due to the presence of circles on stimulus; and a black image, with a white fixation point, presented four seconds, to re-adapt the retina with a dark environment before each threshold measurement. Note that the white elliptic image was presented after the choice screen, and therefore after the recording of threshold value and perceived depth sign. The presentation durations of the white and the black image were calibrated, on two observers (experienced in psychophysics), to no longer have afterimages of the stimulus on the retina at the beginning of the measurement. We found that with two seconds of white and four seconds of black, no afterimages or no visual masking were reported by the two observers.



**Figure 2:** Test sequence. Schematic representation of a threshold measure.

The stimulus consisted of a set of images: each image has a different value of disparity gradient (disparity gradient progressively increased from no disparity gradient for the first image seen, to a disparity gradient for the next images with a fixed increase); and the images of the set

5

were successively presented to the observer (with three images per second). The observer's task was to stop the temporal image succession by a mouse click when he perceived a depth change in the periphery of the stimulus, relative to the perception of the screen plane. An intermediate method between ascending adjustment and ascending limits, where, temporally speaking, the observer triggered the end of disparity gradient increase with a mouse button click, was used to find the point at which the simulated surface appeared to present a depth change in periphery. For one measurement, only the disparity gradient, between two fixed eccentricities, of the stimulus increased. The observer did not really "adjust", but he stopped the disparity gradient increasing when he perceived a depth change. At threshold, the observer had to respond by a mouse click, on the forced choice screen, whether the stimulus periphery was in front of (Figure 3(a)), or behind (Figure 3(b)), the plane of the fixation point? No feedback was given on the correctness of answers. Measurement results with incorrect answers were discarded (the error rate in the choice, relative to the number of repetition for each repeated measurement, was about 1.7%). The observer had a discrimination task, because he was asked to indicate if the deformation he perceived was concave or convex.

Experimental sessions lasted for approximately 30 min, and each observer participated in four sessions. Results from the first experimental session, used for training, were discarded. Detection thresholds were measured for 18 pairs (*a,b*) (nine pairs each for crossed and for uncrossed disparity). Sessions consisted of two repeated measurements of the 18 pairs. With three sessions, we collected six repeated measurements for each pair per observer. Therefore, with eight observers, a total of 48 threshold values was collected for each pair.

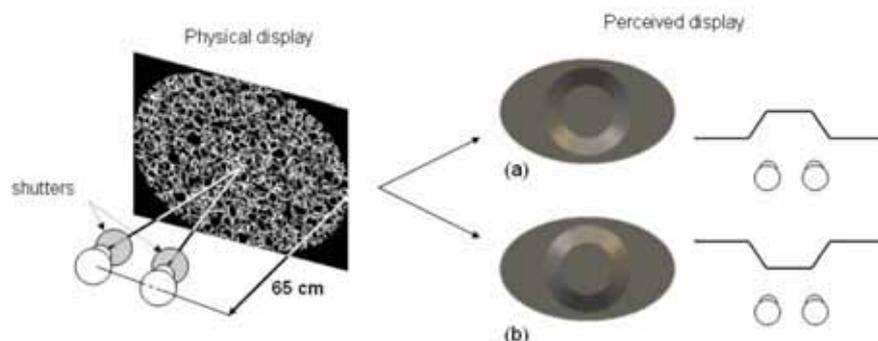


Figure 3: Experimental set-up (left) and observer's predicted depth perception (right): (a) Perceived display with crossed disparities, concave perception. The central disc is normally (in terms of disparity applied) in the screen plane and the peripheral area in front of the screen plane. (b) Perceived display with uncrossed disparities, convex perception. The central disc is also in the screen plane and reciprocally the peripheral area is behind the screen plane.

**APPARATUS.** To create disparities, we used a dichoptic display allowing to obtain an image for each eye by means of shutters and a stereo display (Figure 3): Stimuli were generated by a Silicon Graphics Zx10 workstation and displayed with a video projector (Electrohome marquee ultra, green monochromatic light, 120 Hz frame rate) on a screen ( $129 \times 96$  cm) in front of the observer. Stereograms,  $1824 \times 1368$  pixels, were created using an interlaced frame stereo display synchronized to a pair of electro-optical shutters via an infrared link.

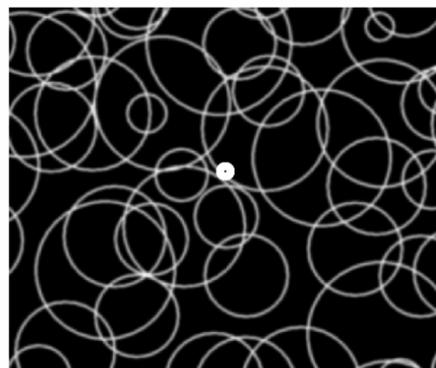
During the stimulus presentation, increment of the image changing was three images per second and increasing of disparity gradient between each image was from  $0.94 \text{ arcsec}^\circ$  (central

pairs) to  $1.30 \text{ arcsec}/^\circ$  (peripheral pairs). A set of stereo pairs with the different values of disparity gradient was precomputed for each pair of eccentricities and for each observer, as a function of his interpupillary distance.

At the viewing distance (65 cm), the display subtended  $89 \times 73^\circ$  of visual angle (shutters did not limit the visual field), and each pixel (in the  $1824 \times 1368$  display) subtended 224 arcsec at the centre (less than 224 arcsec on periphery).

Eye movements were monitored by an electro-oculographic device (EOG) with a saccade threshold of  $6^\circ$ . When EOG detected a saccade higher than  $6^\circ$ , a buzzer noise was emitted and the current threshold measurement was stopped without recording the disparity value. The detection of saccades by EOG (buzzer noise and repetition of the measurement) was sufficiently unpleasant for the observers to dissuade them from producing eye movement. The discarded first session was made in conditions with EOG and the observers were instructed to maintain the fixation on the fixation point, so they were conscious of the importance of a good fixation all along the duration of the measurements.

**STIMULUS.** The stimulus was composed of white open circles on a black background with semi-random distribution (Figure 4). Stereogram density was 36%. This stimulus is a cyclopean stereogram with no preferential direction, allowing a continuous depth perception of image. In the terminology used by Van den Eenden and Spekreijse (1989), the stimulus has a neutral texture perspective. A Gaussian blurring was applied to avoid detection bias (stimulus flickering at the change of image in the disparity variation location) and to prevent aliasing resulting from the interpolation process. The ring-shape, where the disparity gradient varied, could not be identified monocularly on the stimulus. Monocular cues were ruled out by control trials wherein either left or right eye images were presented to both observers' eyes and two observers attempted force-choice discrimination after adjustment. Under these conditions, the two observers never perceived any depth and always demonstrated chance-level performance, which showed that monocular cues were not present in our stereogram display.



**Figure 4:** Central part of the stimulus. The fixation point consisted of a white disc in the centre of the image.

The fixation point was a white disc of  $1^\circ$  of visual angle, binocularly seen to aid vergence and fusion, with a small black point in its centre to constrain accommodation on the screen plane (Figure 4). Observers were instructed to maintain the fixation point as a single point and the black point not as a blur point. To avoid seeing the screen edges, stimulus boundaries were elliptic.

**OBSERVERS.** Eight observers, 3 women and 5 men, aged between 24 and 38, participated in the experiments. All observers had normal visual acuity and good stereo vision (at least 30" stereoacuity by clinical testing).

**CONTROL EXPERIMENT.** An additional experiment with a method of constant stimuli was carried out as a control: Five values of disparity gradient, always located between 7 and 14° of eccentricity, were chosen for crossed and for uncrossed disparities. These values were presented randomly, briefly (300 ms) and 100 times for each value. Three observers participated and their task was to make a forced choice between “concave” or “convex” perception for each value of disparity gradient. The results were graphically represented by the percentages of “concave” answers for each value of disparity gradient. The data was fitted by a sigmoid curve. The curve equation allowed to have a bias and a discrimination sensitivity. The discrimination thresholds could be approximate by the value corresponding to 75% of good answers.

## RESULTS

For each observer, recorded measurements gave several values of disparity gradient for a pair of starting and ending eccentricities and as a function of applied crossed or uncrossed disparities. The stimulus depended on three values: the starting eccentricity ( $a$ ), the ending eccentricity ( $b$ ) and the disparity ( $c$ ). The assumption is that there are two possibilities of detection process: (i) the detection could either be based on the disparity difference ( $c$ ), or (ii) on the disparity gradient (ratio  $\frac{c}{b-a}$ ). Thresholds of deformation detection, in terms of disparity gradient, were distributed between 18 arcsec/° and 90 arcsec/°. This range of thresholds is explained in the next three parts: (1) variability between observers; (2) difference in thresholds between crossed and uncrossed disparities; (3) some differences in thresholds as a function of pairs ( $a,b$ ), and therefore as a function of the disparity variation location. Data was analysed using an analysis of variance (ANOVA) with repeated-measures design. The independent variables were: direction of disparity (crossed, uncrossed); starting eccentricity ( $a$ : 0, 7, 14°), and angular width of variation ( $b - a$ : 7, 14, 21°).

**(1) VARIABILITY BETWEEN OBSERVERS.** Variability in thresholds between observers is significant for crossed and for uncrossed disparities, as shown by ANOVA ( $F_{7,35} = 19.44$ ,  $p < 0.001$  and  $F_{7,22} = 55.89$ ,  $p < 0.001$ , respectively). The range of results was wide between observers but thresholds of disparity gradient as a function of pairs and for crossed or uncrossed disparities showed similar variations. Note that the repeated measurements did not show a high variation between themselves, because the variability within the observers is not significant for the last five measurements (ANOVA:  $F_{4,340} = 2.29$ ,  $p = .06$ ). Therefore the measurements were steady during the experiment.

On the other hand, a control experiment was carried out with three of the eight observers to test a possible effect of the white screen on the threshold measurements: the absence of the white image did not modify significantly the thresholds (ANOVA:  $F_{1,86} = 3.63$ ,  $p = .06$ ), and there was no interaction between the presence or not of the white image, and the observers (ANOVA:  $F_{2,86} = 0.58$ ,  $p = .56$ ).

To study the variability as a function of pairs, or location parameters of the disparity variation, mean results, in terms of either disparity gradient or disparity difference, at perception threshold of surface deformation for all observers were analysed. For mean results analysis, we compared the effect of the starting eccentricity ( $a$ ) and of the extent or angular width of the disparity variation ( $b-a$ ). Each group of variation extent ( $b - a$ ) was chosen to be equal (7, 14 and 21°). Mean gradient values at threshold for each starting eccentricity value ( $a$ ) as a function of the extent of disparity variation were represented in Figure 5.

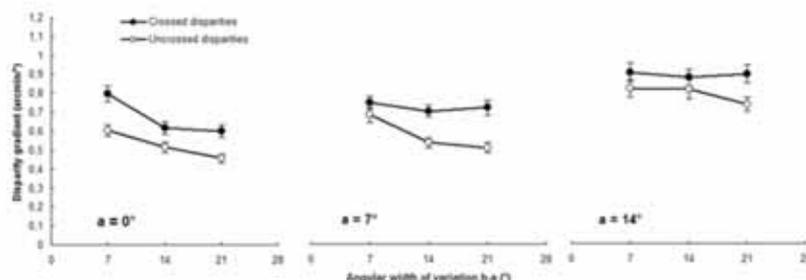


Figure 5: Mean disparity gradient at detection threshold of surface deformation as a function of angular width of disparity variation area ( $b-a$ ) and for the three eccentricities at the beginning of variation ( $a$ ). Closed circles represent crossed disparities and open circles represent uncrossed disparities. Vertical bars indicate  $\pm 1$  standard error.

Comparatively to the disparity gradient (i.e. the first spatial derivative of disparity difference), results can be treated as the disparity difference ( $c$ ) between disparities of the ending and starting eccentricities of variation area. Because the disparity of the central disc (whose radius value is  $a$ ) equals zero, disparity difference equal the disparity at the eccentricity point  $b$ . Figure 6 represents the disparity difference as a function of starting eccentricity ( $a$ ), a graph for each  $a$  value, and as a function of angular width of disparity variation ( $b - a$ ).

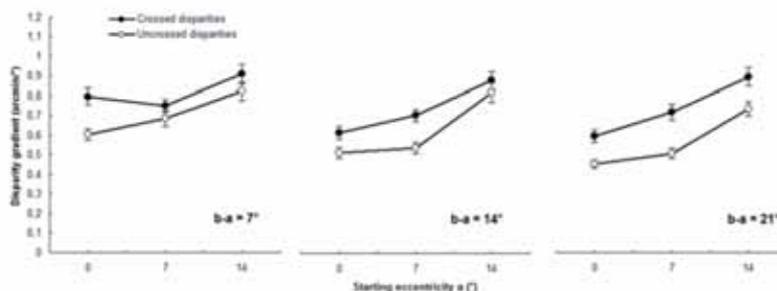


Figure 6: Mean disparity difference between starting and ending eccentricities at detection threshold of surface deformation as a function of angular width of disparity variation area ( $b-a$ ) and for the three eccentricities at the beginning of variation ( $a$ ). Closed circles represent crossed disparities and open circles represent uncrossed disparities. Vertical bars indicate  $\pm 1$  standard error.

**(2) COMPARISON OF CROSSED AND UNCROSSED DISPARITIES.** Firstly, detection thresholds were lower for uncrossed disparities (open circles) than for crossed disparities (closed circles), as can be seen in Figure 5 and Figure 6. An ANOVA confirmed that detection thresholds are significantly different between crossed and uncrossed disparities ( $F_{1,57} = 60.76, p < .001$ ). Secondly, there was no significant interaction between crossed and uncrossed disparities (as a function of starting eccentricity ( $a$ );  $F_{2,57} = .045, p = .95$ ), showing that gradients of crossed and uncrossed disparities in deformation detection threshold have the same trend of sensitivity with respect to other experimental conditions. Results therefore showed similar variation relative to the direction of disparity and the most relevant difference between crossed and uncrossed disparities was thresholds which were systematically lower for uncrossed disparities.

**(3) INFLUENCE OF DISPARITY GRADIENT LOCATION.** Concerning the different parameters of gradient location, the analysis mainly focused on the eccentricity  $a$  and on the angular width of the variation area ( $b - a$ ). At starting eccentricities ( $a$ ) of  $7^\circ$  and  $14^\circ$ , disparity gradient at deformation detection threshold did not vary with angular width of variation area ( $b - a$ ) (Figure 5), with the exclusion of pairs (7,14) of uncrossed disparities ( $7^\circ$  of angular width). For starting eccentricity above  $7^\circ$ , the thresholds of deformation discrimination did not depend on the spatial extent of disparity variation as shown in Figure 5 and confirmed by ANOVA ( $F_{1,26} = 71.89$ ,  $p < .001$ ). This suggests that the starting eccentricity of  $7^\circ$  is a breakpoint from which the detection would be made on disparity gradient. The Figure 6 corroborates this idea: the thresholds of disparity difference depended heavily on the angular width of variation disparity. Results showed that the thresholds in disparity gradient  $\frac{c}{b-a}$  were more constant than the thresholds in disparity difference ( $c$ ).

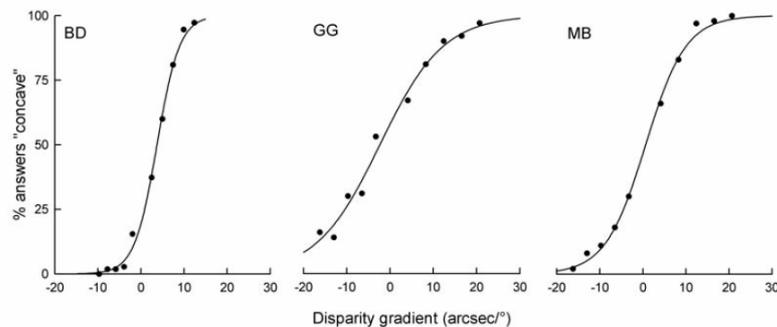
Therefore, results were in favour of a detection of disparity gradient for starting eccentricities beyond  $7^\circ$ .

On the other hand, at a starting eccentricity ( $a$ ) of  $0^\circ$ , disparity gradient at threshold decreased with increasing angular width of variation (Figure 5), and disparity difference at threshold increased with increasing angular width (Figure 6). However, the impact of angular width on disparity gradient sensitivity remains comparatively much weaker than on disparity difference sensitivity (Figure 6). It would seem that detection was not made on disparity gradient nor on disparity difference alone. Moreover, between 0 and  $7^\circ$  of starting eccentricities, disparity gradients are not significantly different for a same angular width " $b - a$ " (Figure 5) and then, disparity difference between the starting and ending eccentricities is approximately the same for a same angular width (Figure 6). These results did not permit to conclude whether detection was made on disparity gradient or on disparity difference.

Note that Figure 5 and Figure 6 also allow to view the results, respectively in terms of disparity gradient and disparity difference, for stimuli in which the eccentricity  $b$  (i.e. the end of the disparity variation) remained constant. For a same  $b$  value ( $14$ ,  $21$  or  $28^\circ$ ), the disparity gradient increased and the disparity difference decreased, with increasing eccentricity  $a$ . Therefore, the extent of the disparity "bump" or "trough" (explained below in the Discussion) was not the relevant parameter in the detection of surface deformation.

Therefore, the results showed a dissociation between: on the one hand, the peripheral starts, where the detection was made only on the disparity gradient; and on the other hand, the central starts, where the detection was made neither on the disparity gradient nor on the disparity difference, with precision.

**RESULTS OF CONSTANT STIMULI EXPERIMENT.** The psychometric functions (sigmoid curves) of the three observers were represented in Figure 7. The value of bias and the discrimination sensitivity (defined by the slope of the curve at 50%) were reported on each graph.



**Figure 7: Psychometric curves corresponding to constant stimuli experiment for the three observers. The bias represented the value for 50% of “concave” answers, and the discrimination sensitivity is the slope of the curve at 50% of “concave” answers.**

The discrimination thresholds of concave and convex deformation could be approximate by the value corresponding to 75% of good answers (or 25 and 75% of “concave” answers). The mean discrimination threshold of concave deformation, in disparity gradient, was  $6 \pm 0.5$  arcsec/°, which corresponds to threshold of crossed disparity. The mean threshold for uncrossed disparity (convex deformation) was  $4.7 \pm 5.6$  arcsec/°. Observer BD had a bias value (3.72 arcsec/°) in crossed disparity and a sharp slope (9.56), that is to say he had a concave perception of the frontoparallel plane and his convex perception threshold was close to zero arcsec/°.

#### DISCUSSION

A previous study (Devisme et al., 2004) highlighted that perception thresholds of surface deformation depend not on disparity at a given eccentricity, but on the disparity gradient applied at this eccentricity. Detection of surface deformation would not be based on the value of disparity at a given point but on the disparity gradient at this point. The most relevant gradient factor in this detection would be the eccentricity of the beginning of the disparity variation. Only crossed disparities were studied.

The present study measured deformation detection thresholds for crossed and uncrossed disparities (respectively concave and convex surface deformation) to extend these previous results and to conclude about the processing of horizontal disparity in surface deformation perception, in the peripheral visual field.

**DIFFERENCES BETWEEN CROSSED AND UNCROSSED DISPARITIES.** The deformation detection thresholds were significantly lower for uncrossed disparities than for crossed disparities. This difference means that the finest detection is for uncrossed disparities, or convex surface deformation. The difference is partly explained by geometrical optics and the fact that the distance scaling of disparity information is different between crossed and uncrossed disparity: the same absolute value of disparity in stereograms gives a larger physical depth for uncrossed disparity than for crossed disparity. Physical depth refers to the position of the stereoscopic form relative to the depth plane of the frontoparallel screen plane in the case of a true depth perception, or, in other words, the distance scaling of disparity information (Cormack & Fox, 1985; Ritter, 1977). Ogle (1958) found that the stereoscopic acuity did not change with increasing distance, whereas, for a same angular disparity value, the physical distance largely increases with an increase in viewing distance. He concluded that the binocular judgement was not based on physical depth. He used a

test line at  $0.5^\circ$  of a fixation line, which corresponded to the central area, and the proximity to the fixation point could probably not allow to judge with physical distance. Our experimental conditions were very different in terms of eccentricity to the fixation point and size and shape of the test target. When the disparities lie in a large peripheral field, the visual system could estimate physical depth distance from the frontoparallel plane. Otherwise, the perceived depth seems to correspond to that predicted by the geometry of binocular viewing for crossed disparity and seems to be frequently less than predictions for uncrossed disparity (Patterson & Fox, 1984; Patterson, Moe & Hewitt, 1992). Patterson et al. (1992) investigated physical depth in various conditions (size, duration and distance). Their thresholds were in accordance with physical depth for crossed disparity. For uncrossed direction, they observed an underestimation for a brief duration (160 ms), small size ( $1^\circ$  of width) and large distance (150 cm). Our conditions, in terms of duration, size and distance corresponded to the case where there is a good accordance between percept depth and physical depth. In other respects, the method of constant stimuli, used in the complementary experiment, showed a bias in the sense of a convex perception of the frontoparallel plane for two observers (BD and MB), but the third tended to have a bias in the opposite direction, a slight concave perception of the frontoparallel plane. Nevertheless, the calculation of the physical distance perceived stereoscopically relative to a given angular disparity indicates that the difference in physical distance between crossed and uncrossed angular disparities is larger for high disparity value (as obtained with our adjustment method) than for very low disparity value (as with constant stimuli method): for example, a difference of approximately 0.2 arcsec, between crossed and uncrossed disparity of about 36 arcsec, yields an equivalent physical distance for, respectively, in front and rear directions; comparatively, a value of 360 arcsec of crossed disparity creates the same physical distance than a value of 345 arcsec of uncrossed disparity, but in the opposite direction, at  $7^\circ$  of eccentricity. For the angular disparity values measured with the method of constant stimuli (close to 36 arcsec), the physical distances were not so different for crossed and uncrossed direction, and for the ones measured with our adjustment method (more than 360 arcsec), the physical distance is higher for uncrossed than crossed disparities. This physical interpretation could explain why the difference, observed with our adjustment method, is significant in comparison with the constant stimuli method. Therefore the significant difference observed for our adjustment method was not always found with other procedures, depending on the level of disparity values at threshold. If the visual system estimates physical depth distance from the frontoparallel plane, then the same distance in front or behind means larger crossed than uncrossed disparity values, when measured by our adjustment method, that accounts for higher sensitivity for uncrossed disparity, as has been reported.

This better performance for uncrossed disparities can also be explained by the fact that this experiment was carried out in the prehension, or grasping area (65 cm). Indeed, in this near space, there would be a preferential processing of convex surfaces (because humans are used to grasping objects of convex shape) and observers would be more sensitive to objects approaching them (survival concept). In this case, concentric gradients of uncrossed disparity produce convex perceived surfaces, where periphery should be perceived behind fixation plane. Observers reported to perceive the central area approaching, for uncrossed disparity (or moving away for crossed disparity). The observer's task was to detect a change in depth in peripheral visual field, but observers probably detected more easily a "bump" or a "trough" of various extents in the center of the stimulus. Moreover, the detection of a "bump" moving towards the observer could be faster than a "trough". The "bump" can also cause faster reaction times and hence could explain the lower thresholds for uncrossed than for crossed disparities. Previous studies found that the detection duration for uncrossed disparity stimuli was longer than for crossed disparity stimuli of the same absolute value (Manning, Finlay, Neill & Frost, 1987; Patterson, Cayko, Short, Flanagan, Moe, Taylor & Day, 1995). Their stimuli were squares between 1 and 4 arc degree at the fixation point or at  $3^\circ$  max of eccentricity, which was the central area regarding the present study. The authors

highlighted that the detection was more rapid for the depth in front of, than behind, the fixation plane, as shown by our “bump” (with uncrossed disparities) and “trough” (with crossed disparities), respectively. As Patterson et al. (1995) proposed, discrimination would be made on depth and not on disparity. Becker, Bowd, Shorter, King and Patterson (1999) showed that depth discrimination depended on the depth position of disparity plane relative to background dots at screen distance: when disparate stimuli (crossed and uncrossed) were in front of the background dots, there was no difference between crossed and uncrossed disparities; when disparate stimuli were behind the background dots, difference was low; when uncrossed stimuli were behind and crossed stimuli in front of the background dots, the difference was high. The authors interpreted these discrimination changes by the occlusion of the stimuli by the background dots. In the present experiment, there was no equivalent of the background dots. So that the occlusion effect postulated by Becker et al. could not account in the reported difference between crossed and uncrossed direction. Nevertheless, the background could correspond to the periphery of our stimulus (beyond eccentricity  $b$ ). In this case, crossed stimuli had the centre behind the periphery (background) and uncrossed stimuli had the centre in front of the periphery (background). Therefore crossed depth discrimination would be in the “back” condition and uncrossed depth discrimination would be in the “front” condition, in the words of Becker et al. (1999), and it could explain why depth discrimination was lower for crossed than for uncrossed disparity.

The observers could already have a convex perception of the screen plane and their frontoparallel reference plane, or their perception of frontoparallel plane, would be slightly concave (crossed disparities). Mainly one observer (BD) out of three really had a bias towards uncrossed disparities with constant stimuli method, which means he would have a convex perception of the frontoparallel plane. For some observers, the bias towards uncrossed disparities could therefore explain the lower thresholds for uncrossed than for crossed disparities. Nevertheless, this control experiment with constant stimuli method did not always reveal the effect of the disparity direction, perhaps because of the small number of observers and because of the physical depth difference between crossed and uncrossed disparity which is less for the low disparity values (see above).

Moreover, previous research on *stereoanomaly* (Richards, 1971) showed differences in sensitivity to crossed and uncrossed disparities, that suggested separate neural processings of crossed and uncrossed stereopsis. For Patterson and Fox (1984), the stereoanomaly highlighted by Richards may rather reflect the method of brief exposure durations used in this case. Our threshold differences between crossed and uncrossed disparities could also be consistent with the different types of disparity-tuned cells found in the monkey and in the cat: *far* cells that are excited by uncrossed disparities and inhibited by crossed, and *near* cells are excited by crossed disparities and inhibited by uncrossed, in striate (V1) and prestriate (V2) cortex of the macaque and in areas 17 and 18 of the cat (Poggio, Motter, Squatrito & Trotter, 1985; Howard, 2002). The existence of the same types of disparity-tuned cells in humans could provide an explanation concerning the difference in sensitivity between crossed and uncrossed disparities.

**COMMON BEHAVIOUR FOR BOTH SIGNS OF DISPARITY.** Our results highlighted that thresholds of crossed and uncrossed disparities have the same variation as a function of starting eccentricity and as a function of variation extent. In the following, we considered crossed and uncrossed disparities together.

The first observation is the comparison of our thresholds with the ones of previous studies. The specific experimental method made comparison with other literature difficult. On the one hand, in terms of disparity gradient, Mitchison and McKee (1990) reported slant thresholds using surface of a small angular extent (from  $0.5$  to  $2^\circ$ ) for ten observers. Their thresholds for either horizontal or vertical gradient of horizontal disparity were distributed from  $1.8$  to  $426$  arcsec/ $^\circ$ . Comparatively, our thresholds for concentric disparity gradient and for a large extent were close to the mean value (from  $18$  to  $90$  arcsec/ $^\circ$ ). Our radial gradient of horizontal disparity, which contains gradients in all

the orientations, was a combination of vertical gradient and horizontal gradient. Mitchison and McKee (1990) found an anisotropy between horizontal and vertical gradients: vertical gradients were more easily detected than horizontal. In our case, the applied gradient had no preferred orientation, so the thresholds were in the mean value. Our thresholds were measured by a method of adjustment, which is known to produce higher thresholds than a forced choice method. The additional experiment was carried out with a constant stimuli method (control experiment). The mean thresholds, in disparity gradient, were, for crossed disparity  $6 \pm 0.5$  arcsec/°, and for uncrossed disparity  $4.7 \pm 5.6$  arcsec/°. Comparatively, the method of adjustment gave, for the pair (7,14), a mean value of 45 arcsec/° for crossed disparity, and 40.8 arcsec/° for uncrossed disparity. The very low values obtained with the constant stimuli method were in the limit of angular resolution due to the wide visual field of the display. The threshold differences, between the ones measured by the adjustment method and those obtained by the method of constant stimuli, can be explained by hysteresis phenomenon: An initial perception of frontoparallel plane stimulus was kept, with a progressive disparity increase, for a larger disparity limit than that of a stimulus that was presented briefly alone. Other explanations could be the adaptation usually observed with an adjustment method and a possible level of confidence in the perception of deformation. Nevertheless, observers were relatively constant in their thresholds with this method. Therefore, during the experiment, the observers must have kept the same strategy in their decision to detect the deformation, which permitted us to be confident in the threshold values. Note that the thresholds of 40.8 and 45 arcsec/° of magnitude for respectively uncrossed and crossed disparity, measured by our adjustment method, corresponded to more than 99% of convex or concave answers with method of constant stimuli (see Figure 7). Threshold values with constant stimuli method correspond to 75% of good answers (concave or convex). If the effect was only due to a high level of confidence (if no adaptation occurred), the thresholds we observed in adjustment method would indicate that the observers waited until reaching 99% of confidence. This seems clearly implausible, taking into account the instructions given to the observers, to respond as quickly as possible. Therefore, this high percentage of good answers, for threshold values with our adjustment method, suggests that the adaptation effect plays an important role. Finally, the experimental conditions of our adjustment method are closer to a natural condition than of a constant stimuli method: disparities rarely appear suddenly in the visual field as presented in constant stimuli method, and observers are not constrained. A good example of frequent situations in which disparities are maintained in the visual field is ophthalmic glasses with which the deformations created are permanent. The lenses produce disparity gradients in the visual field and the report of wearers is the tolerance for deformation, induced by the disparity field.

On the other hand, some authors studied the sensitivity to disparity corrugations. In terms of disparity corrugation, our stimulus, with disparity gradient between two eccentricities, represented a ramp, and then it contained a wide range of corrugation frequencies. Prince and Rogers (1998) used a circumferential disparity modulation in an annular area with a constant width. Our thresholds were higher than theirs. Comparison with Prince and Rogers' study can only be made for 0, 7 and 13° of eccentricity (14° for our study). The peak of frequency in our disparity modulation was the fundamental frequency ( $1/40^\circ = 0,025$  cpd), and then it was lower than spatial frequencies studied by Prince and Rogers. In these conditions, they reported disparity threshold approximately three times lower ( $\sim 18$  arcsec) than in the present study ( $> 300$  arcsec) for 13° of eccentricity, and more for the other eccentricities. Detection of disparity corrugations could be made at the borders of the annulus, this could be easier in their study than in ours, in terms of depth contrast. Bradshaw and Rogers (1999) reported disparity sensitivity functions for horizontal or vertical corrugations in the central area (corresponding to our 0° of eccentricity). They obtained a mean threshold of horizontally oriented corrugations for 0.025 cpd approximately eight times less ( $\sim 30$  arcsec) than our mean threshold at 0° ( $> 250$  arcsec), vertically oriented corrugations were not tested for this low spatial frequency. In our study, central presentation was neither purely horizontal nor purely vertical

corrugation but a cone expanding in all directions. 30 arcsec of horizontal corrugations for 0.025 cpd corresponds to a disparity gradient of 1.5 arcsec/°, in our experiment. The limitation of angular resolution, because of the large visual extent, could explain these differences in thresholds, essentially for the central area. With decreasing spatial disparity to low spatial frequencies, thresholds of the two experiments, cited above, increased. Our results corresponding to extremely low spatial frequencies are consistent with this effect.

The second observation is that two areas of disparity variation can be distinguished in the visual field:

- Peripheral area: Figure 5 (centre and right graphs) shows that detection in periphery was mainly based on disparity gradient and not on disparity difference (Figure 6, centre and right graphs).
- Central area: Left graph of Figure 5 indicates that detection in central area seems to be based on a combination between disparity gradient and disparity difference (left graph of Figure 6).

The difference between these two areas can be firstly explained by the fact that deformations were conical for central pairs and truncated cones for peripheral pairs. Shape from disparity was not the same depending on the two cases and therefore disparity processing could be different.

Secondly, the difference between central and peripheral area can be explained by the stimulus surface on which the disparity gradient was applied, relative to the whole surface of the stimulus (2% for the smallest central cone and 9% for a conical deformation of 14° of radius, versus 31%, for example, for a truncated cone of 14° of angular width in periphery).

Thirdly, if the assumption is that the detection is made on discontinuity of disparity gradient (Mitchison & Westheimer, 1984), the central case was special because the discontinuity was only a point, compared to the other cases where it was a circle. And in terms of detection of gradient discontinuity, it would be easier to perceive a circle than a single point.

Rawlings and Shipley (1969) measured thresholds of stereoscopic discrimination for horizontal disparities as a function of eccentricity, up to an eccentricity of 8°. Their stereoacuity thresholds ranged from 216 arcsec at 6° of eccentricity to 360 arcsec at an eccentricity of 8°, this approximately corresponds to the value we found in disparity difference for the pair (0,7), this is also, in this case, the disparity at the eccentricity of 7°.

Therefore, for disparity variation in the central area, the visual system could detect a depth contrast between the peripheral area (with continuous disparity) and the central point that represents a disc of 1° diameter (see Figure 4). We could relate this phenomenon of depth contrast to the notion of *saliency* (Mitchison & Westheimer, 1984; Westheimer, 1986; Westheimer & Levi, 1987). Detection would thus be made part on disparity gradient and part on a depth contrast for disparity variation in the central area, whereas it would be made mainly on disparity gradient in the peripheral area.

**REFERENCE PLANE.** As reported by observers, the central area of the stimulus was perceived to approach for uncrossed disparity (or move away for crossed disparity). Therefore, deformation was probably judged by the observers by taking “periphery as a reference” and the observers perceived the central area as detached from their “reference plane”. Some previous studies showed that the sensitivity of the human stereoscopic system is determined by disparity of points compared to a local reference plane (Glennerster et al., 2002; Petrov & Glennerster, 2004; Glennerster & McKee, 2004). While, in our experiment, observers were instructed to hold fixation on the central point, the reference plane associated to their perceptive judgment was rather defined by the peripheral stimulus.

The fact that the fixation point with null disparity was perceived to change in depth could also be explained with the effect of residual cues, such as accommodation, which was normally fixed on the fixation point. Inappropriate screen cue (inappropriate focus screen) can have a

significant effect on 3D percepts (Watt, Banks, Ernst & Zumer, 2002; Watt, Akeley & Banks, 2003).

Another reason why the reference plane was not the screen plane could be the fact that the screen plane is only represented by a disc of 1°, whereas the peripheral plane occupies a much larger area of visual field.

#### CONCLUSION

The present study provided quantitative estimates of the sensitivity of human observers in a task of surface deformation discrimination, in the cases of concave or convex deformations, obtained with gradient of horizontal disparities (respectively crossed or uncrossed).

The detection of convex deformations is finer than the detection of concave deformations. This is ecologically explained by the fact that we have always been used to grasping convex surfaces and we are more sensitive to objects which move towards us (it is the case of convex deformations for which we perceive the central part approaching us). Moreover, the deformation was judged by the observer by taking "periphery as a reference". Indeed, observers perceived the central area which is detached from their "reference plane". For uncrossed and crossed disparities, the periphery should be perceived respectively behind and in front of the screen plane. However some observers reported perceiving the central area respectively in front of and behind its true position, or in other words the central area seems to move towards or away from the observers. Therefore, the fixation plane was not the observers' reference plane for peripheral judgment.

For disparity variations located in the peripheral area, the detection thresholds depend on disparity gradient and on the starting eccentricity of disparity variation, whereas for those started in the central area, the detection is based neither precisely on disparity gradient nor on disparity difference. In the central area, the visual system could detect depth contrast more than disparity: it could process the discontinuities of constant disparity variations. In the peripheral area, the processing of horizontal disparity would be more global.

*Acknowledgements* – The authors wish to thank the anonymous reviewers for their relevant and helpful comments on this manuscript. We also thank colleagues who volunteer as observers. We acknowledge the contribution of Thierry Bonnin for his technical assistance in EOG. This work was supported by the company Essilor International and the ANRT association (Convention CIFRE No.761/2004).

#### REFERENCES

- Andrews, T.J., Glennerster, A., & Parker, A.J. (2001). Stereoacuity thresholds in the presence of a reference surface. *Vision Research*, 41, 3051-3061.
- Becker, S., Bowd, C., Shorter, S., King, K., & Patterson, R. (1999). Occlusion contributes to temporal processing differences between crossed and uncrossed stereopsis in random-dot displays. *Vision Research*, 39, 331-339.
- Bourdy, C. (1989). Reconstruction et interprétation 3D en vision binoculaire humaine. Traitement de « l'information disparité ». *Journal of Optics*, 20, 243-258.
- Bradshaw, M.F., & Rogers, B.J. (1999). Sensitivity to horizontal and vertical corrugations defined by binocular disparity. *Vision Research*, 39, 3049-3056.

- Cormack, R., & Fox, R. (1985). The computation of disparity and depth in stereograms. *Perception & Psychophysics*, 38, 375-380.
- Devisme, C., Monot, A., Drobe, B., & Pedrono, C. (2004). Does the perception of surface deformations result from global or local processing of disparity gradient? *Perception*, 33 (Suppl), 93.
- Drobe, B., & Monot, A. (1997). Partition of perceived space within the fusional area on the basis of apparent fronto-parallel plane criterion. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 17, 340-347.
- Gillam, B., Flagg, T., & Finlay, D. (1984). Evidence for disparity change as the primary stimulus for stereoscopic processing. *Perception & Psychophysics*, 36, 559-564.
- Glennerster, A., & McKee, S.P. (1999). Bias and sensitivity of stereo judgements in the presence of a slanted reference plane. *Vision Research*, 39, 3057-3069.
- Glennerster, A., & McKee, S.P. (2004). Sensitivity to depth relief on slanted surfaces. *Journal of Vision*, 4, 378-387.
- Glennerster, A., McKee, S.P., & Birch, M.D. (2002). Evidence for Surface-Based Processing of Binocular Disparity. *Current Biology*, 12, 825-828.
- Howard, J.P. (2002). Physiology of disparity, Chap.6. In: I. Porteous (Ed.), *Seeing in Depth*, Vol.1 Basic Mechanisms. Toronto: University of Toronto Press.
- Lunn, P.D., & Morgan, M.J. (1997). Discrimination of the spatial derivatives of horizontal binocular disparity. *Journal of the Optical Society of America A*, 14, 360-371.
- Manning, M.L., Finlay, D.C., Neill, R.A., & Frost, B.G. (1987). Detection threshold differences to crossed and uncrossed disparities. *Vision Research*, 27, 1683-1686.
- McKee, S.P. (1983). The spatial requirements for fine stereoacuity. *Vision Research*, 23, 191-198.
- Mitchison, G.J., & McKee, S.P. (1990). Mechanisms underlying the anisotropy of stereoscopic tilt perception. *Vision Research*, 30, 1781-1791.
- Mitchison, G.J., & Westheimer, G. (1984). The perception of depth in simple figure. *Vision Research*, 24, 1063-73.
- Ogle, K.N. (1950). Studies of the empirical longitudinal horopter, Chap.4 ; Spatial Localization and stereoscopic vision, Chap.12. In: *Research in Binocular Vision* (pp. 173-199). Philadelphia and London: Press of W.B. Saunders Company.
- Ogle K.N. (1958). Note on stereoscopic acuity and observation distance. *Journal of the Optical Society of America*, 48, 794-798.
- Patterson, R., Cayko, R., Short, G.L., Flanagan, R., Moe, L., Taylor, E., & Day, P. (1995). Temporal integration differences between crossed and uncrossed stereoscopic mechanisms. *Perception & Psychophysics*, 57, 891-897.
- Patterson R., & Fox R. (1984). The effect of testing method on stereoanomaly. *Vision Research*, 24, 403-408.
- Patterson, R., Moe, L., & Hewitt, T. (1992). Factors that affect depth perception in stereoscopic displays. *Human Factors*, 34, 655-667.
- Petrov, Y., & Glennerster, A. (2004). The role of a local reference in stereoscopic detection of depth relief. *Vision Research*, 44, 367-376.
- Poggio, G.F., Motter, B.C., Squatrito, S., & Trotter, Y. (1985). Responses of neurons in visual cortex (V1 and V2) of the alert macaque to dynamic random-dot stereograms. *Vision Research*, 25, 397-406.
- Prince, S.J.D., & Rogers, B.J. (1998). Sensitivity to disparity corrugations in peripheral vision. *Vision Research*, 38, 2533-2537.

- Rawlings, S.C., & Shipley, T. (1969). Stereoscopic acuity and horizontal angular distance from fixation. *Journal of the Optical Society of America*, 59, 991-993.
- Richards, W. (1971). Anomalous stereoscopic depth perception. *Journal of the Optical Society of America*, 61,410-414.
- Ritter, M. (1977). Effect of disparity and viewing distance on perceived depth. *Perception & Psychophysics*, 22, 400-407.
- Rogers, B., & Cagenello, R. (1989). Disparity curvature and the perception of three-dimensional surfaces. *Nature*, 339, 135-137.
- Tyler, C.W. (1983). Sensory processing of binocular disparity, Chap.7. In: C. Schor & K. Ciuffreda (Eds.), *Vergence Eye Movements : basic and clinical aspects*. London-Boston: Butterworth.
- Tyler, C.W. (1991). The Horopter and Binocular Fusion, Chap.2; Cyclopean Vision, Chap. 3. In: D. Regan (Ed.), *Vision and visual dysfunction*, Vol.9. London: Macmillan.
- Van den Enden, A., & Spekreijse, H. (1989). Binocular depth reversals despite familiarity cues. *Science*, 244, 959-961.
- Watt, S.J., Akeley, K., & Banks, M.S. (2003). Focus cues to display distance affect perceived depth from disparity. *Journal of Vision*, 3(9), 66a.
- Watt, S.J., Banks, M.S., Ernst, M.O., & Zumer, J.M. (2002). Screen cues to flatness do affect 3d percepts. *Journal of Vision*, 2(7), 297a.
- Westheimer, G. (1986). Spatial interaction in the domain of disparity signals in human stereoscopic vision. *Journal of Physiology*, 370, 619-629.
- Westheimer, G., & Levi, D.M. (1987). Depth attraction and repulsion of disparate stimuli. *Vision Research*, 27, 1361-1368.

## **II Le post-effet de relief**

### **II.1 Présentation et mise en évidence de l'effet**

Le jugement spatial peut être déformé par un changement soudain des propriétés spatiales d'une présentation visuelle, cette déformation du jugement spatial est causée par une adaptation antérieure. Le post-effet est l'équivalent, pour la perception de forme, de la post-image. La post-image se produit après un éblouissement lumineux de la rétine, de telle sorte que si l'on regarde une surface sombre, on continue à percevoir une forme lumineuse, et si l'on regarde une surface claire, une forme sombre sera perçue correspondant à la zone rétinienne éblouie. Des post-effets peuvent être induits dans la perception de taille, longueur, proximité, direction, courbure, mouvement, orientation ou profondeur (Howard et Rogers, 2002). Lors des expériences de disparité binoculaire, il s'agit d'une présentation en relief, par exemple concave ou convexe, après laquelle la présentation d'une image sans disparité entraînera une perception de relief dans le sens opposé, respectivement convexe ou concave. Le post-effet est de relief opposé par rapport à la forme d'adaptation, on parle alors de post-effet négatif.

Des effets consécutifs ont été mis en évidence et étudiés dans la perception de la profondeur binoculaire avec des stéréogrammes à points aléatoires (Long et Over, 1973 ; Graham et Rogers, 1982 ; Lee, 1999 ; Seyama *et al.*, 2000 ; Taya *et al.*, 2005) : un stimulus d'adaptation de 6 à 8 minutes d'arc de disparités horizontales et présenté pendant 500 ms produit un post-effet maximal. Par contre, une différence de disparité entre le stimulus d'adaptation et le stimulus de test de plus de 16 minutes d'arc empêche l'induction d'un post-effet. De plus, le post-effet est toujours négatif, il est maximal quand la surface d'adaptation et la surface test sont présentées dans le même plan de profondeur et il diminue avec l'éloignement de ces deux plans. Enfin, la forme géométrique bidimensionnelle de la surface d'adaptation affecte peu l'importance du post-effet, et la présence de post-effet n'est pas toujours dépendante de la position rétinienne stimulée. Ces différents travaux sur les effets consécutifs du relief, ou effets de contraste successif dans la perception de relief, ont permis d'étudier les mécanismes liés au traitement des disparités.

Les expériences réalisées sur la disparité horizontale consistaient en la présentation successive d'images ne contenant d'abord pas de disparité, puis un faible gradient de disparité était introduit et augmentait progressivement. L'observateur avait pour tâche de détecter une déformation du plan fronto-parallèle, de type convexe ou concave. Au moment de la détection de déformation du plan, l'observateur arrêtait le défilement des images par un clic de souris. Après un écran de choix, puis une image noire (image de préfixation) pendant quatre secondes, une nouvelle mesure était réalisée, donc une nouvelle série d'images était présentée.

Un observateur a signalé la perception d'un effet consécutif de relief lors de la présentation de la première image (sans disparité) d'une nouvelle série. Cet effet consécutif était décrit de la façon suivante : si la série précédente donnait une perception concave au seuil de détection de la déformation, la première image de la nouvelle série était perçue comme légèrement convexe. Et inversement une déformation concave était perçue après une série aboutissant à une perception convexe. Il s'agit donc d'un post-effet négatif, car de sens opposé au stimulus d'adaptation.

La conséquence de la présence de post-effet peut d'abord être que l'observateur, percevant une déformation dès la première image, déclenche immédiatement la fin de l'ajustement. D'autre part, et dans le cas où l'observateur est prévenu de la possibilité d'une première image déjà déformée, les seuils de détection peuvent s'en trouver modifiés, dans le sens d'une diminution ou d'une augmentation, selon le sens de la déformation présentée par rapport au sens de l'effet consécutif initial. Ceci nous a conduits à étudier l'influence du post-effet sur les valeurs de seuils de détection d'une déformation d'une surface fronto-parallèle, en fonction du signe du post-effet. Une partie des résultats de l'analyse de l'influence des post-effets a été présentée sous la forme d'un abstract (Devisme *et al.*, 2006b).

## **II.2 Etude de l'influence du post-effet sur les seuils de détection d'une déformation du plan fronto-parallèle**

### **II.2.1 Traitement des données**

Pour étudier l'influence du post-effet, nous avons analysé les valeurs de seuils de détection d'une déformation du plan fronto-parallèle en fonction du post-effet, par rapport à la déformation présentée. Le post-effet est supposé négatif, donc il est de signe opposé à la mesure de seuil réalisée juste avant, qui est dans ce cas le stimulus d'adaptation.

Les résultats des mesures de seuils de discrimination d'une déformation concave ou convexe du plan fronto-parallèle, induite par des disparités horizontales, dans le cadre de la comparaison de deux stimuli (expérience décrite dans le Chapitre 3) sont ainsi analysés de nouveau pour tenir compte de l'éventuel post-effet. Les valeurs de seuils utilisées ont été obtenues pour cinq observateurs (BD, CP, GG, CH et MB).

Les valeurs de seuils ont été triées au préalable en fonction de la présence potentielle ou non de post-effet. Les mesures ayant été considérées comme dépourvues de post-effet dans un premier temps sont les cas suivants : il s'agit de la toute première mesure de seuil, ou bien si la mesure précédente a été annulée avant le seuil par le déclenchement de l'électro-oculographie, ou encore si la réponse à la mesure précédente était erronée. Les mesures retenues pour l'analyse pouvaient être de deux sortes : (1) le post-effet est de même sens que la mesure qui commence, et dans ce cas la mesure précédente était de sens opposé ; (2) le

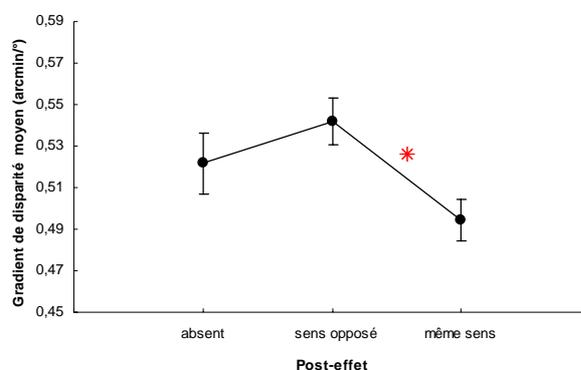
post-effet est de sens opposé par rapport à la mesure, quand la mesure précédente était de même sens. Ces deux groupes contiennent un nombre équivalent de valeurs.

Notons que les valeurs de seuils n'ont pas été analysées comme des mesures répétées pour une même série, mais comme une nouvelle mesure. Dans l'analyse précédente des gradients de disparité horizontale en fonction de l'excentricité, nous avons utilisé une analyse de variance avec mesures répétées, puisque nous considérons que la répétition d'une mesure l'était si elle était réalisée dans les mêmes conditions d'excentricités et de signe de la disparité. Dans le cas du post-effet, les répétitions pour le même couple d'excentricité et le même signe de disparité pouvaient difficilement l'être également pour le signe et la forme de la mesure précédente, et donc du post-effet. Dans le cas présent, le phénomène de post-effet est donc indépendant des répétitions des mesures.

## II.2.2 Résultats de l'étude de l'influence du signe du post-effet

### II.2.2.1 Résultats généraux

La comparaison des seuils obtenus sans post-effet, des seuils avec un post-effet opposé et des seuils avec un post-effet de même sens montre des différences statistiquement significatives (ANOVA<sub>post-effet</sub> :  $F_{2,907} = 13,74$  ;  $p < 0,001^4$ ). La Figure 38 illustre les différences de seuils entre ces trois possibilités.



**Figure 38 - Variation des seuils de détection de déformation en fonction du post-effet.** Le post-effet est soit absent, soit dans le sens opposé à la série présentée, soit dans le même sens que la série présentée. L'astérisque rouge au-dessus d'une ligne indique une différence significative au seuil de 0,05 entre les deux valeurs reliées par cette ligne. Les barres d'erreur représentent  $\pm$  l'erreur-type.

La Figure 38 met principalement en évidence une différence entre les seuils moyens avec un post-effet dans le sens opposé et un post-effet dans le même sens que la série présentée. Les valeurs de seuils dans le cas considéré comme sans post-effet ne sont pas analysées dans cette partie, car elles sont en quantité moindre comparativement aux valeurs en présence d'un post-effet. Ainsi, les seuils sont significativement différents entre les deux

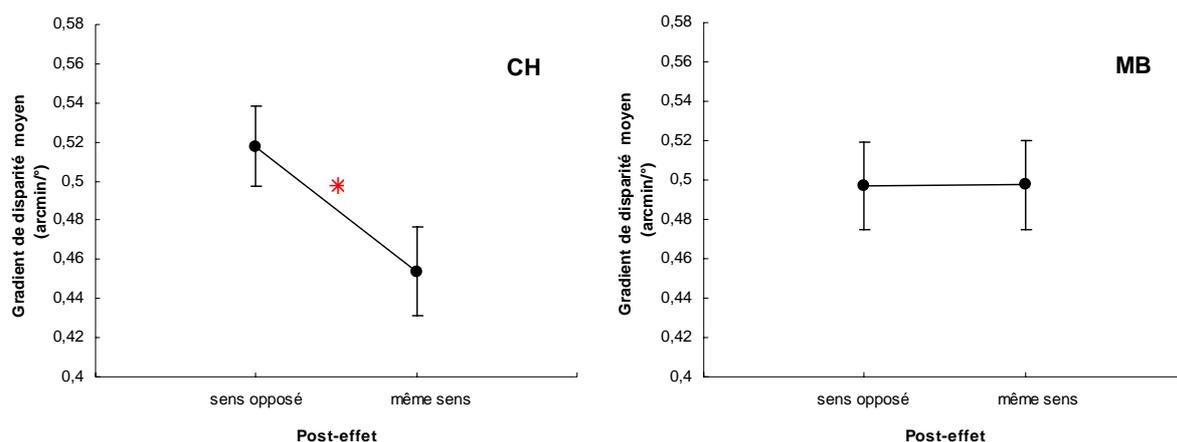
<sup>4</sup> ANOVA : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue; variables catégorielles : observateurs, type de disparité, série et sens du post-effet.

types de post-effet (test post-hoc :  $p < 0,001^5$ ). Plus précisément, quand le post-effet est de sens opposé, les seuils sont supérieurs à ceux dont le post-effet est de même sens.

Après cette analyse globale des résultats, nous allons à présent nous intéresser aux résultats individuels, uniquement pour la comparaison des seuils en fonction du sens du post-effet.

La Figure 39 représente, pour deux observateurs caractéristiques, les graphiques correspondant à la valeur des seuils de détection d'une déformation en fonction du sens du post-effet. Les analyses détaillées par observateur se trouvent en Annexe 11. Trois observateurs montrent une différence significative entre les seuils après un post-effet dans le même sens et les seuils après un post-effet de sens opposé ( $p < 0,004^6$ , exemple de CH, Figure 39 à gauche). Pour ces trois observateurs, il s'agit d'une augmentation des seuils quand le post-effet est de sens contraire.

Par contre, les deux autres observateurs ne montrent pas de différences significatives entre les seuils selon le type de post-effet ( $p > 0,68^6$ , exemple de MB, Figure 39 à droite).



**Figure 39 - Comparaison des seuils de détection d'une déformation selon le sens du post-effet pour deux observateurs.** Le post-effet est soit dans le sens opposé, soit dans le même sens que la série présentée. L'astérisque rouge indique une différence significative au seuil de 0,05 entre les deux valeurs considérées. Les barres d'erreur représentent  $\pm 1$  erreur-type.

Parmi les cinq observateurs, trois semblent sensibles au post-effet et les réponses des deux autres ne semblent pas influencées par un quelconque post-effet. Un observateur (BD) a indiqué verbalement sa perception de post-effet, ses seuils montrent que ce post-effet perçu a influencé son jugement. Le post-effet peut ne pas être perçu, pour les deux autres observateurs (CH et GG), et modifier les seuils, on dira qu'il s'agit d'une perception non consciente de post-effet. Enfin pour les deux derniers observateurs (MB et CP), n'ayant pas de différences de seuils en fonction d'un supposé post-effet, et n'en ayant pas évoqué sa présence, deux

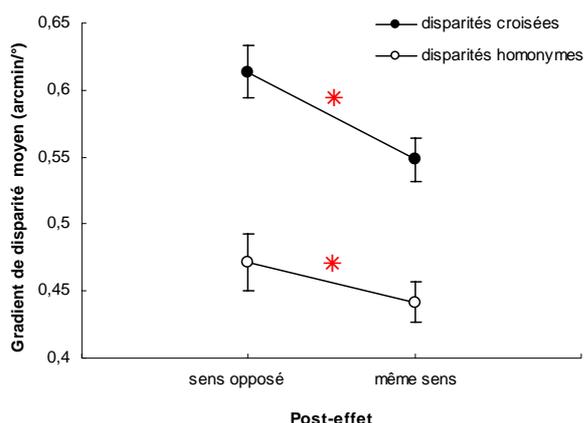
<sup>5</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effet : post-effet.

<sup>6</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effet : post-effet \* observateurs.

possibilités peuvent être envisagées : soit ils n'ont pas de post-effet, soit la perception de post-effet est non consciente et cet effet consécutif non conscient n'influence pas le jugement spatial de ces deux observateurs.

### II.2.2.2 Comparaison selon le signe de la disparité horizontale

Les disparités horizontales introduites pouvaient être croisées ou homonymes. Les disparités croisées, appliquées en périphérie du champ visuel, produisent une déformation concave du plan fronto-parallèle, et les disparités homonymes une déformation convexe du plan fronto-parallèle. Les seuils de discrimination des déformations convexes sont plus faibles que les seuils de discrimination des déformations concaves (cf. § I.3). Par rapport à ces différences de seuils selon le signe de la disparité horizontale, donc le sens de la déformation en profondeur, nous pouvons nous demander si les post-effets de ses différentes déformations vont influencer différemment les seuils de discrimination des déformations. L'étude de l'influence du post-effet sur les seuils de détection d'une déformation, en fonction du signe de la disparité horizontale pour l'ensemble des observateurs, est représentée par la Figure 40.



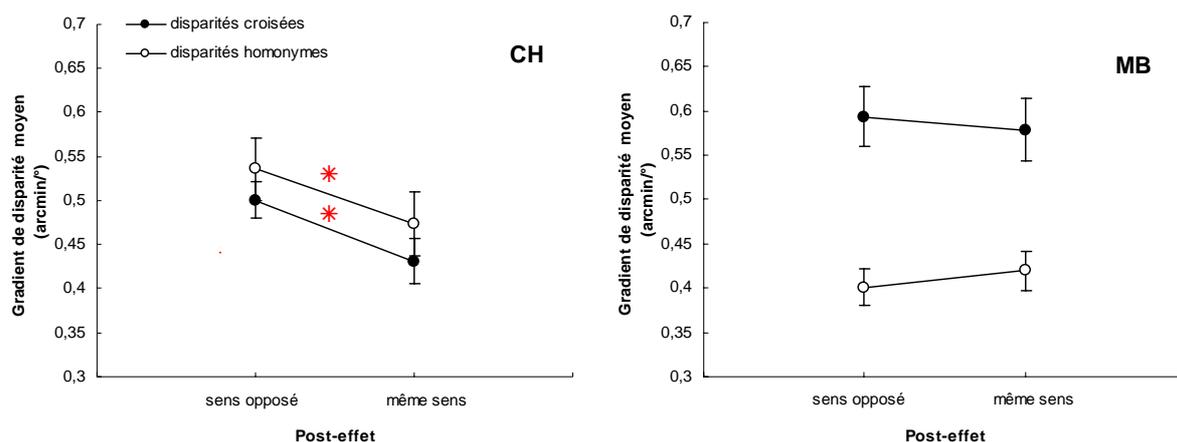
**Figure 40 - Représentation des gradients de disparité au seuil de détection d'une déformation, concave ou convexe, d'une surface plane en fonction du sens du post-effet.** Le sens de la déformation est noté en termes de disparité : les disparités croisées sont schématisées par les losanges pleins, et les disparités homonymes par les losanges vides. Un astérisque rouge indique une différence significative au seuil de 0,05 entre les deux valeurs considérées. Les barres d'erreur représentent  $\pm$  l'erreur-type.

Les seuils en fonction du sens du post-effet suivent une variation équivalente quel que soit le signe de la disparité (ANOVA  $_{\text{signe de disparité} \times \text{post-effet}}$  :  $F_{1, 669} = 0,028$  ;  $p = 0,87^7$ ), dans le sens d'une diminution entre un post-effet de sens opposé et un post-effet de même sens. En effet, les différences de seuils en fonction du sens du post-effet sont significatives pour les disparités croisées comme pour les disparités homonymes (tests post-hoc :  $p < 0,04^8$ ).

<sup>7</sup> ANOVA : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue uniquement en présence de post-effet ; variables catégorielles : observateurs, signe de la disparité, série et sens du post-effet (opposé ou même).

<sup>8</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue uniquement en présence de post-effet ; effets : post-effet \* signe de la disparité.

L'analyse intra-individuelle reflète en partie les résultats moyens ci-dessus, mais également l'observation précédente sur l'ensemble des disparités horizontales par observateurs. Les deux observateurs dont les post-effets ne semblaient pas influencer les seuils, confirment ce résultat quel que soit le signe de la disparité horizontale ( $p > 0,39^9$ , exemple de MB, Figure 41 à droite). Pour les trois autres observateurs, deux d'entre eux confirment la modification des seuils en fonction du sens du post-effet que ce soit pour les disparités croisées ou homonymes ( $p < 0,05^9$ , exemple de CH, Figure 41 à gauche).



**Figure 41 - Comparaison des seuils de détection d'une déformation en fonction du sens du post-effet, selon le signe de la disparité horizontale, pour deux des cinq observateurs.** Le post-effet est soit dans le sens opposé, soit dans le même sens que la série présentée. Le sens de la déformation est noté en termes de disparité : les disparités croisées sont schématisées par les losanges pleins, et les disparités homonymes par les losanges vides. L'astérisque rouge indique une différence significative au seuil de 0,05 entre les deux valeurs considérées. Les barres d'erreur représentent  $\pm$  l'erreur-type.

Par contre, pour un seul observateur (BD), les seuils suivent la même tendance à diminuer, entre un post-effet de sens opposé et un post-effet de même sens, selon le signe de la disparité horizontale, mais pour les disparités homonymes la différence de seuils n'est pas significative ( $p = 0,16^9$ ), alors qu'elle l'est pour les disparités croisées ( $p < 0,01^9$ ). Les graphiques et le détail pour chaque observateur se trouvent en Annexe 11.

### II.2.2.3 Résultats complémentaires

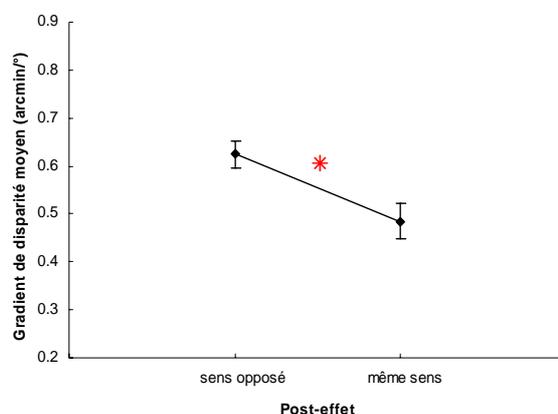
#### II.2.2.3.1 Etude des « post-effets infraliminaires »

Dans notre tri initial des données, nous avons exclu des valeurs de seuils que nous avons jugées dépourvues de post-effets. Parmi ces mesures « sans post-effet », deux cas d'exclusion peuvent être analysés sous le qualificatif de « post-effets infraliminaires » : (1) les post-effets suivant une mesure pour laquelle la réponse au choix forcé (concave / convexe) était erronée, en considérant que la détection s'est produite juste avant la discrimination du sens correct de la déformation de surface ; (2) les post-effets résultant des mesures où l'EOG

<sup>9</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue uniquement en présence de post-effet ; effets : post-effet \* observateurs \* signe de la disparité.

a détecté un mouvement oculaire, et donc stoppé le défilement des images, mais au-delà de la dixième image présentée. Dans ce cas, le mouvement oculaire pouvait être une saccade exploratoire pour vérifier la perception en champ périphérique. Ces post-effets sont qualifiés d'« infraliminaire », faisant suite à une réponse de détection infraliminaire. Le but de l'analyse de ces cas particuliers est de savoir si la présentation de valeurs de disparités infraliminaires peut produire un post-effet, indiquant une perception de déformation non consciente. Le nombre d'occurrences de ces possibles post-effets suite à une réponse « infraliminaire » est relativement faible pour une analyse détaillée (91 occurrences au total, dont 20 pour le premier cas).

L'analyse de l'influence d'un post-effet infraliminaire sur les seuils de détection d'une déformation est détaillée en Annexe 11. Les post-effets infraliminaires semblent influencer significativement les seuils et selon la même tendance que les post-effets non infraliminaires, comme le montre la Figure 42 (ANOVA<sub>post-effet</sub> :  $F_{1, 59} = 4,25$  ;  $p = 0,04$ <sup>10</sup>).



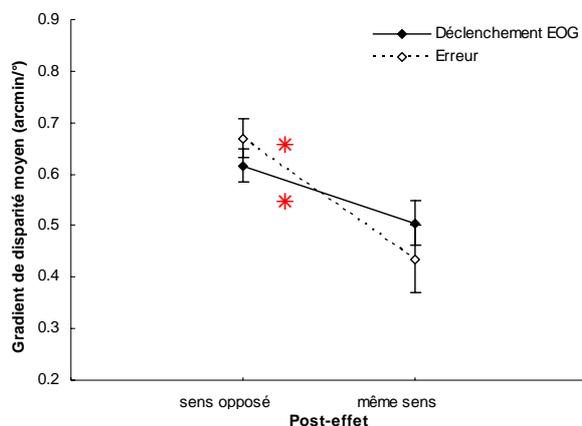
**Figure 42 - Représentation des seuils de détection d'une déformation, concave ou convexe, d'une surface plane en fonction du sens du post-effet prédit – cas de post-effets dits infraliminaires.** Le graphique regroupe l'ensemble des observateurs et la disparité horizontale quel que soit son signe. L'astérisque rouge indique une différence significative au seuil de 0,05 entre les deux valeurs considérées. Les barres d'erreur représentent  $\pm$  l'erreur-type.

La tendance à une diminution des seuils entre un post-effet de sens opposé et un post-effet de même sens semble se retrouver pour les disparités horizontales croisées et homonymes (ANOVA<sub>post-effet\*signe de disparité</sub> :  $F_{1, 59} = 1,38$  ;  $p = 0,25$ <sup>10</sup>). Les résultats intra-individuels sont moins pertinents, compte tenu du peu de valeurs utilisées pour chaque observateur. De même, le type de post-effet infraliminaire (suite à une réponse infraliminaire due au déclenchement de l'EOG ou suite à une réponse erronée au choix forcé) semble confirmer les résultats globaux (test post-hoc :  $p < 0,01$ <sup>11</sup>). L'influence du post-effet semble

<sup>10</sup> ANOVA : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue pour les mesures rejetées ; variables catégorielles : observateurs, signe de la disparité, série et sens du post-effet (opposé ou même).

<sup>11</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effets : post-effet \* type de réponse infraliminaire.

plus importante pour les post-effets infraliminaires par erreur à la mesure précédente que ceux suite au déclenchement de l'EOG (Figure 43).



**Figure 43 - Représentation des seuils de détection d'une déformation, concave ou convexe, d'une surface plane en fonction du sens du post-effet prédit infraliminaire, selon la cause de la réponse infraliminaire.** Le graphique regroupe l'ensemble des résultats : Les losanges pleins représentent le cas du déclenchement de l'EOG à une saccade exploratrice par exemple, et les losanges vides quand il s'agissait d'une erreur dans la réponse au choix forcé. Un astérisque rouge indique une différence significative au seuil de 0,05 entre les deux valeurs considérées. Les barres d'erreur représentent  $\pm$  l'erreur-type.

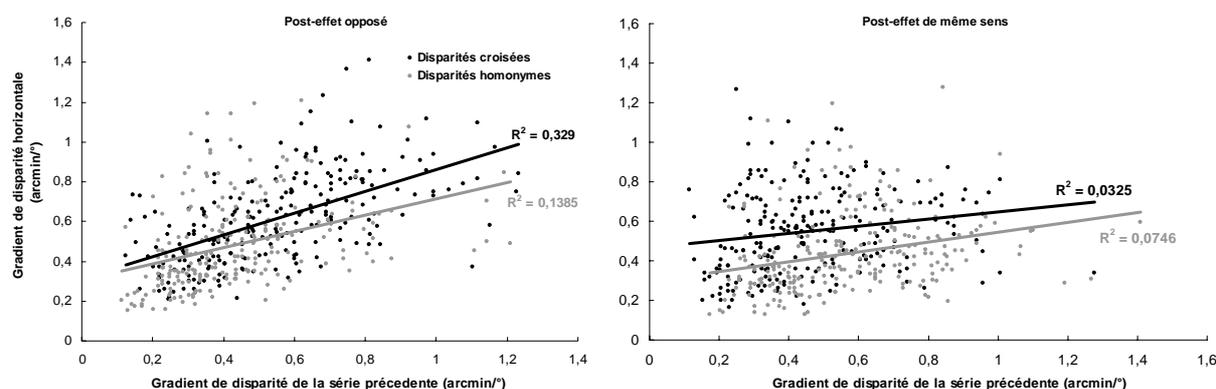
Les seuils en gradient de disparité semblent globalement montrer des différences selon le signe du post-effet infraliminaire (s'il est de même signe ou de signe opposé), dans le même sens que pour les post-effets liminaires, étudiés plus haut (cf. § II.2.2.1) : pour l'ensemble des post-effets dits infraliminaires, les gradients de disparité sont plus faibles pour les mesures dont le post-effet était de même signe que celles dont le post-effet était de signe opposé. Ce résultat est retrouvé également pour les deux causes de réponses dites infraliminaires lors de la précédente mesure (soit par réponse erronée au choix forcé, soit par déclenchement de l'EOG causé par un mouvement oculaire). L'effet plus important dans le cas d'erreur à la mesure précédente par rapport au cas de déclenchement de l'EOG s'explique par le fait que lors d'une erreur au choix forcé, la valeur obtenue est souvent très proche du seuil de détection, ce qui n'est pas toujours le cas lors du déclenchement de l'EOG.

Ainsi, une réponse infraliminaire à la détection d'une déformation d'un plan fronto-parallèle peut produire un post-effet. Ce post-effet va influencer la mesure de seuil de détection qui commence. Les mesures qui suivent une réponse infraliminaire pourront donc être conservées pour la suite de l'étude de l'influence du post-effet.

Suite à cette étude de l'influence des post-effets consécutifs à une présentation qualifiée d'infraliminaire, il nous a semblé intéressant d'analyser les valeurs de seuils mesurés (en gradient de disparité) en fonction du gradient de disparité présenté juste avant (pouvant peut-être donner une prédiction de l'importance du post-effet). On part de l'hypothèse que l'importance du post-effet dépend de la valeur de disparité inductrice présentée juste avant. Ainsi on se demande si l'importance du post-effet a une influence sur les seuils mesurés. Les

seuils de détection mesurés en gradient de disparité sont donc étudiés en fonction de la valeur de gradient présenté juste avant. Les données sont modélisées par des droites de régression. Dans un premier temps, les seuils sont étudiés en fonction du sens du post-effet par rapport à la mesure (de même sens ou de sens opposé). Les deux graphiques de la Figure 44 montrent toutes les valeurs de gradient de disparité mesurées (un point par valeur) et la droite de régression que l'on peut tracer à partir de ces points, en séparant les disparités horizontales croisées et homonymes : pour les post-effets de sens opposé, la régression linéaire donne un  $R^2 = 0,33$  ( $p < 0,001^{12}$ ) pour les disparités croisées, et un  $R^2 = 0,14$  ( $p < 0,001^{12}$ ) pour les disparités homonymes ; pour les post-effets de même sens,  $R^2 = 0,032$  ( $p = 0,005^{12}$ ) pour les disparités croisées et  $R^2 = 0,075$  ( $p < 0,001^{12}$ ) pour les disparités homonymes.

Les résultats obtenus pour chacun des observateurs n'apportent pas d'éléments supplémentaires, car pour chaque observateur et pour les quatre conditions (post-effet de même sens ou de sens opposé, disparités croisées ou homonymes), le nombre de valeurs est assez faible.



**Figure 44 - Droites de régression des gradients de disparité (en minutes d'arc par degré) au seuil de détection en fonction du gradient de disparité de la dernière image de la série précédente :** à gauche quand la série précédente était de même sens que la série mesurée (post-effet prédit de sens opposé) ; et à droite quand elle était de sens opposée (post-effet prédit de même sens) ; en noir pour les disparités croisées et en gris pour les disparités homonymes.

Cette analyse des droites de régression montre des résultats significatifs de l'influence du post-effet prédit par la valeur de seuil de la mesure précédente sur la mesure de seuil, mais la variance ( $R^2$ ) est très faible, en particulier pour les post-effets de même sens. Quel que soit le sens du post-effet, plus de 50 % des résultats ne sont donc pas expliqués par la régression ( $R^2 < 0,50$ ). Ces résultats montrent une relative influence de l'importance prédite du post-effet sur la mesure de seuil. Cette influence est plus marquée pour les post-effets de sens opposé que pour les post-effets de même sens. Si on compare aux précédents résultats, on peut noter les éléments suivants : nous avons observé d'une part que les post-effets prédits de sens opposé vont avoir tendance à influencer les seuils dans le sens d'une augmentation ; et d'autre part, les post-effets prédits de même sens que la mesure faciliteraient la détection, et ainsi les

<sup>12</sup> Régression linéaire simple pour les disparités horizontales croisées ou homonymes et pour un post-effet de même sens ou de sens opposé.

seuils seraient plus faibles. Il nous faut donc regarder les deux graphiques de la Figure 44 en tenant compte de ces observations antérieures : pour les post-effets de sens opposé, l'importance du post-effet pourrait impacter les seuils, plus le post-effet serait important et plus les seuils seraient élevés. Les droites de régression pour les post-effets opposés indiquent une tendance dans ce sens. Pour les post-effets de même sens, on s'attendrait plutôt à l'effet inverse, plus le post-effet serait important et plus les seuils seraient faibles. Les droites de régression ayant une pente plus faible ( $R^2$  proche de zéro) dans ce cas, il semblerait que, si la valeur de la mesure précédente prédit l'importance du post-effet, alors, dans le cas d'un post-effet de même sens que la mesure effectuée, l'importance du post-effet a une influence plus modérée sur la valeur de seuil mesurée.

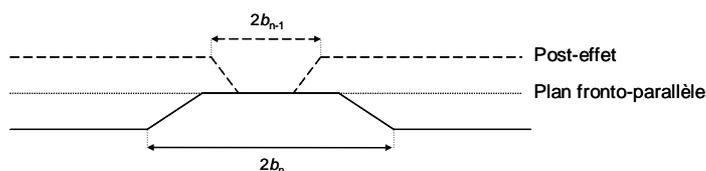
En conclusion de cette analyse, il y a une influence de l'importance du post-effet, que l'on suppose proportionnelle à la valeur de la mesure précédente, sur la mesure de seuil que l'on effectue. Notons que dans notre cas, comme nous le verrons ci-après, la mesure ne s'effectue pas sur des séries rigoureusement semblables du point de vue de la position du gradient de disparité dans le champ visuel (on a testé plusieurs excentricités de départ et de fin de variation), et nous obtenons des valeurs de seuils qui dépendent de la localisation du gradient (en particulier de son excentricité de départ). Il est donc difficile de mettre en évidence un lien entre l'importance d'un post-effet et la mesure effectuée, les conditions expérimentales ne permettant pas une maîtrise de tous les paramètres. Il pourrait donc être intéressant de creuser cette question par une expérience pour laquelle la position du gradient de disparité serait toujours la même, et où l'on choisirait volontairement de tester différentes force du post-effet sur les mesures (par différentes valeurs de gradient de disparité pour l'adaptation).

#### **II.2.2.3.2 Etude de l'influence des dimensions de la déformation**

L'étude de Taya *et al.* (2005) a montré que la correspondance en termes de localisation et de forme bidimensionnelle entre le stimulus d'adaptation et le test n'affecte pas nécessairement le post-effet. Dans notre expérience, la forme globale du stimulus d'adaptation et du test (première image sans disparité) est toujours identique, il s'agit du pourtour elliptique et le recouvrement est total à chaque fois. Par contre, pour étudier l'influence du post-effet sur les mesures de seuils, on peut s'intéresser au recouvrement en termes de taille de la zone déformée. Le recouvrement entre la déformation d'adaptation et la déformation testée dépend de ce que l'on considère comme déformation d'adaptation : soit on considère la déformation concave ou convexe (délimitée par le cercle de rayon  $b$ ) ; soit on considère la zone disparate uniquement (au-delà de l'excentricité  $a$ ). Selon le cas, le recouvrement est partiel ou total. Toutes les valeurs de seuils ont été analysées une nouvelle fois en fonction de la taille de la déformation détectée par rapport à la taille du post-effet. Cette nouvelle étude s'intéresse à la taille angulaire de la déformation d'adaptation, entraînant un post-effet, par

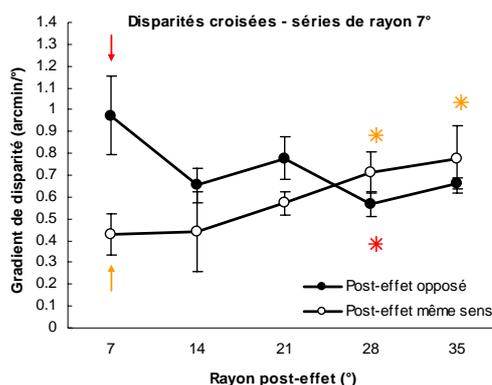
rapport à la taille angulaire de la déformation présentée. L'ensemble des analyses présentées ci-dessous est détaillé en Annexe 11.

La taille de la déformation est d'abord définie par son diamètre, c'est-à-dire que seule l'excentricité de fin de la variation de disparité ( $b$ ) a été prise en compte, donnant le rayon de la déformation (Figure 45). La comparaison qui nous intéresse plus exactement est celle entre les valeurs dont le rayon du post-effet et de la déformation sont identiques et les valeurs dont le rayon du post-effet et de la déformation sont différents. Cette comparaison est faite pour des post-effets soit tous dans le même sens que la déformation, soit tous de sens opposé.



**Figure 45 - Représentation schématique de l'étude de l'influence de la taille de la déformation du post-effet et de la mesure consécutive, basée sur le diamètre de la concavité ou de la convexité.** Dans cet exemple le post-effet et la mesure sont de taille différente ( $b_{n-1}$  et  $b_n$ ) et de sens opposé.

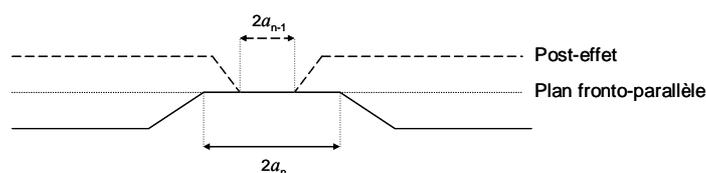
L'analyse des diamètres des post-effets par rapport aux séries mesurées donne des résultats ponctuellement significatifs, mais dans la plupart des cas, le nombre de valeurs de seuil considérées est faible. Aussi, malgré cela, le point intéressant que l'on peut retirer de cette analyse est que seuls les post-effets, ayant un rayon de  $7^\circ$ , semblent influencer les seuils de perception d'une déformation. Mais ce sont également ceux pour lesquels le nombre de valeurs est le plus limité. Et plus exactement, les post-effets de rayon  $7^\circ$  vont particulièrement influencer les mesures de rayon  $7^\circ$ , comme le montre la Figure 46.



**Figure 46 - Comparaison des seuils de détection d'une déformation concave (disparité croisée) de surface plane en fonction du rayon du post-effet pour une déformation de  $7^\circ$  de rayon.** Le post-effet est de même signe que la déformation pour les ronds creux et de signe opposé à la déformation pour les ronds pleins. Les flèches indiquent les valeurs de référence, de rayons identiques entre le post-effet et la déformation mesurée, valeurs auxquelles sont comparées les autres de rayon de post-effet différent. Les astérisques indiquent une différence significative par rapport à la valeur de référence de même couleur. Les barres d'erreur représentent  $\pm$  l'erreur-type.

Pour compléter l'étude de la surface de la déformation, il nous a semblé intéressant de voir si la zone disparate (délimitée par le rayon central de l'anneau déformé ou l'excentricité

de départ, a) du post-effet prédit par rapport à celle de la déformation mesurée avait une influence sur les seuils de détection de la déformation. Les valeurs de seuils ont été analysées cette fois en fonction de l'excentricité de départ de la série précédente (Figure 47). La question étant : Est-ce qu'un post-effet de même excentricité de départ (donc de même disque central sans disparité) que la déformation qui apparaît va améliorer (par exemple pour un post-effet de même signe) ou, au contraire, détériorer (pour un post-effet de signe opposé) la détection de cette déformation ? Les résultats ont été divisés en deux groupes selon le signe de la disparité (croisée / homonyme). Chaque groupe est traité séparément, sachant qu'on obtient des valeurs de seuils différentes selon le signe de la disparité.



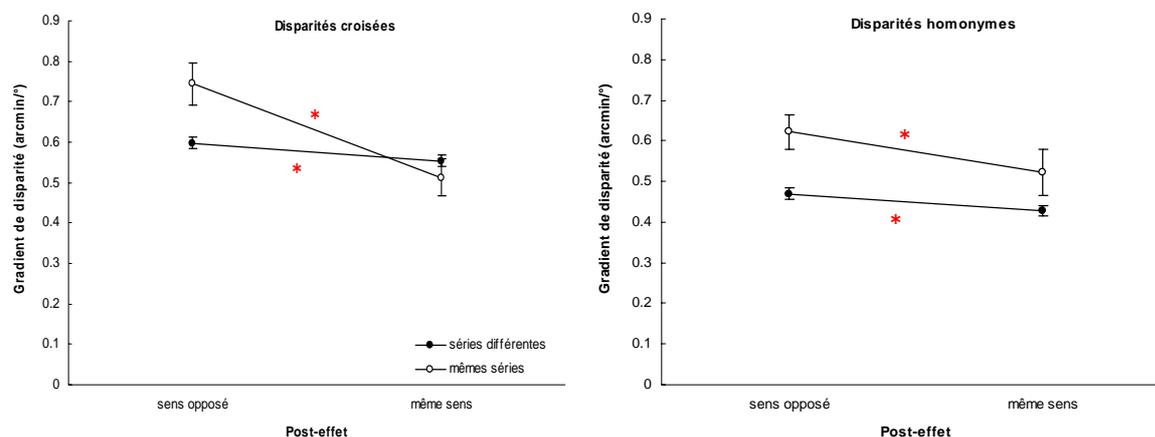
**Figure 47 - Représentation schématique de l'étude de l'influence de la taille de la déformation du post-effet et de la mesure consécutive, basée sur le diamètre ( $2a$ ) de la zone centrale sans disparité. Dans cet exemple le post-effet et la mesure sont de taille différente ( $a_{n-1}$  et  $a_n$ ) et de sens opposé.**

La comparaison qui nous intéresse plus précisément est celle entre les valeurs dont les excentricités de départ du post-effet et de la déformation sont identiques et les valeurs dont les excentricités de départ du post-effet et de la déformation sont différentes. Cette comparaison est faite pour des post-effets soit tous dans le même sens que la déformation, soit tous de sens opposé. Par exemple, en disparité croisée, pour les séries mesurées d'excentricité  $7^\circ$ , d'un côté on va comparer les seuils moyens obtenus quand le post-effet est de même sens et de même excentricité (donc  $7^\circ$ ) aux seuils moyens des post-effets de même sens pour les autres excentricités ( $0$  et  $14^\circ$ ). D'un autre côté, on va comparer les seuils lors d'un post-effet de même excentricité mais de sens opposé aux seuils des post-effets pour des excentricités différents mais également de sens opposé. Ensuite on procède de même pour les disparités homonymes.

On observe des différences significatives surtout entre les post-effets de sens contraire à la mesure. Plus précisément, les seuils sont fréquemment plus élevés quand le post-effet de sens contraire est de même excentricité de départ. Le point important de cette analyse est que l'influence du post-effet est plus importante quand le post-effet est de même excentricité de départ que la mesure qui le suit et surtout s'il est de sens opposé à la déformation mesurée. On peut également ajouter que l'influence du post-effet selon son sens est mise en évidence par des post-effets de même excentricité de départ que la mesure qui suit.

Ces deux dernières analyses nous poussent à comparer le cas particulier d'un post-effet identique en surface (mêmes excentricités de départ  $a$  et de fin  $b$ ) à la mesure qui suit par rapport aux autres cas où les séries qui se suivaient étaient différentes (et donc les post-effets et mesures non exactement identiques). Ce cas particulier s'est produit 103 fois (sur 927

mesures au total). L'analyse statistique indique une interaction significative entre les mêmes séries post-effet/mesure et des séries différentes (ANOVA  $\text{sens post-effet} * \text{post-effet/mesure}$  :  $F_{1, 887} = 11,21$  ;  $p < 0,001^{13}$ ) : en effet la différence de seuil selon le signe du post-effet semble plus importante quand le post-effet et la mesure sont de même surface. La comparaison du cas des post-effets et mesures identiques avec les autres cas est représentée séparément pour les disparités croisées et homonymes sur la Figure 48.



**Figure 48 - Comparaison des seuils de détection d'une déformation concave (disparités croisées, à gauche) et convexe (disparités homonymes, à droite) de surface plane pour des post-effets et mesures identiques ou différents, en fonction du sens prédit du post-effet.** Les post-effets et les mesures sont identiques pour les ronds vides et différents pour les ronds pleins. Les astérisques indiquent une différence significative selon le sens du post-effet. Les barres d'erreur représentent  $\pm$  l'erreur-type.

Les seuils sont toujours différents selon le sens du post-effet par rapport à la mesure réalisée, pour les disparités homonymes comme pour les disparités croisées (tests post-hoc :  $p < 0,04^{14}$ ) : ils sont plus élevés quand le post-effet est de sens opposé à la mesure et plus faibles quand il est de même sens. Les graphiques de la Figure 48 indiquent que l'effet des mêmes surfaces du post-effet et de la mesure est plus important pour les disparités croisées que pour les disparités homonymes.

### II.2.3 Discussion générale sur l'effet consécutif du relief pour des déformations concave ou convexe de surface

Nous avons d'abord vu que selon les observateurs, le post-effet peut ou non influencer les résultats en termes de seuils, en gradient de disparité horizontale, de perception d'une déformation concave ou convexe d'un plan fronto-parallèle. Les seuils de perception sont modifiés de la façon suivante : un post-effet de même sens en profondeur que la déformation, que l'observateur doit discriminer, facilite la détection, les seuils de perceptions sont plus

<sup>13</sup> ANOVA : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; variables catégorielles : observateurs, signe de la disparité horizontale, sens du post-effet (opposé ou même) et séries post-effet/mesure (mêmes ou différentes).

<sup>14</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effets : signe de la disparité horizontale \* signe du post-effet \* correspondance de surface entre post-effet et mesure.

faibles. Inversement un post-effet de relief opposé donne des seuils plus élevés. Ensuite, le post-effet modifie les seuils de façon semblable entre les disparités croisées et homonymes, sauf pour un observateur dont les seuils de détection de déformation convexe (disparités homonymes) ne varient pas selon le signe du post-effet.

De plus, il est intéressant de noter que l'analyse des mesures suivant une mesure qualifiée d'« infraliminaire » va également provoquer des variations de seuil, selon le sens de cette mesure « infraliminaire », semblable à celles trouvées dans le cas général. Ainsi il en résulte qu'une mesure infraliminaire semble produire un post-effet qui peut influencer les résultats de la mesure qui va suivre. Si l'importance du post-effet peut être prédite par la valeur de gradient de disparité du stimulus d'adaptation, alors plus un post-effet de sens opposé est important et plus il semble avoir d'influence sur la mesure de seuil. Cette observation indiquerait qu'un post-effet dit « infraliminaire » et de sens opposé influence moins la mesure de seuil qu'un post-effet liminaire. Néanmoins, ces observations doivent être remises dans le contexte de l'expérience, où les post-effets prédits et les mesures n'étaient pas semblables du point de vue de la localisation, plusieurs conditions d'excentricités étaient étudiées. Les résultats ont montré que les seuils en gradient de disparité dépendaient de l'excentricité de départ en particulier.

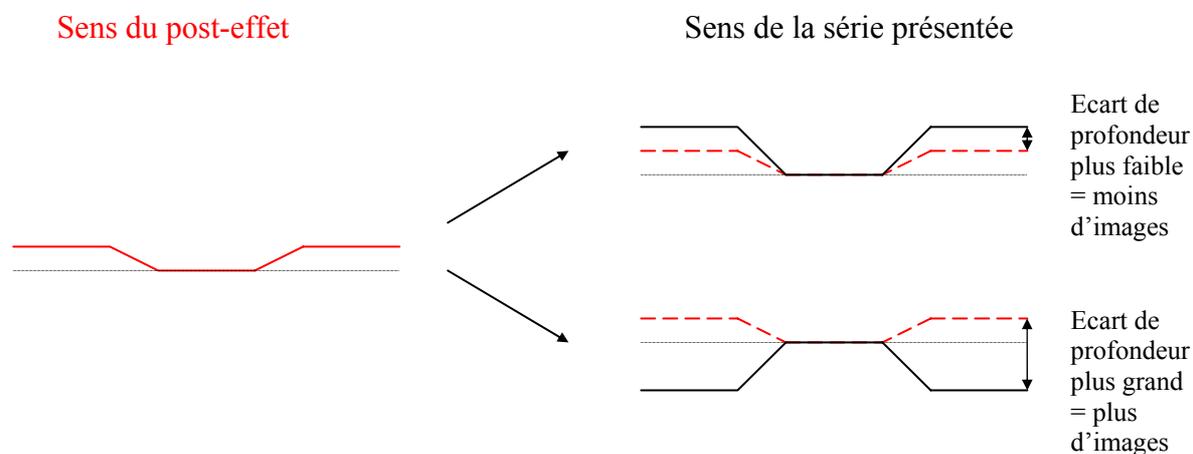
D'autre part, l'étude de l'influence du diamètre du post-effet en fonction du diamètre de la déformation mesurée sur les seuils de détection ne semble pas montrer de différences généralisables. Néanmoins, le cas des post-effets ayant une forme prédite de  $7^\circ$  de rayon ( $b$ ) donne des résultats significatifs indiquant que ces post-effets peuvent influencer dans un sens ou dans l'autre les mesures des seuils de détection. Plus exactement, ceci renforce la particularité de cette série d'excentricité finale  $7^\circ$ , par rapport aux autres séries. En effet, précédemment (cf. § I.3) nous avons observé, en termes de gradient de disparité au seuil de détection d'une déformation de surface plane, que cette série comprise entre 0 et  $7^\circ$  était particulière. On peut ajouter que cette série peut également influencer la mesure qui va suivre immédiatement après, par son post-effet, mais il n'y a pas de règle. Il faut préciser dans ce cas que la série (0,7) est celle qui introduit le plus de disparités dans le champ. Pour aller plus loin, l'analyse des seuils en fonction du post-effet selon les excentricités de départ (donc les rayons centraux des déformations) du post-effet et de la mesure montre que les mesures de rayon central  $0^\circ$  sont plus influencées par les post-effets, mais surtout les post-effets de rayon central  $0^\circ$ . Enfin, après étude de la surface du post-effet puis de son rayon central, il semblerait finalement que les post-effets qui influenceraient le plus les seuils de détection d'une déformation de surface plane sont ceux de même construction précisément, ou de même couple ( $a,b$ ). Les autres post-effets influencent également les seuils de détection dans le même sens, mais dans une moindre mesure.

Un observateur (BD) a indiqué sa perception du post-effet au début d'une grande partie des séries, par contre les autres observateurs n'ont pas mentionné la présence de post-effet. Il faut donc savoir si la perception du post-effet est gênante ou non pour l'observateur. Nous avons donc essayé de voir comment ce post-effet pourrait être supprimé.

Un essai a été réalisé avec l'observateur BD avec, juste avant l'image de préfixation noire, une image pour faire apparaître le post-effet. Cette image est la première image de la série (le stimulus sans disparité) que l'on présente pendant 6 secondes. Pendant ces 6 secondes, le post-effet a le temps de se produire, et n'interférera pas dans la mesure de détection suivante. L'image noire est ensuite présentée pendant 2 secondes, temps suffisant pour remettre à zéro la perception visuelle, à savoir éliminer la perception d'effet consécutif en début de chaque mesure. Mais on peut se demander si l'absence de perception « physique » du post-effet signifie qu'il est complètement absent et qu'il n'influence pas tout de même nos mesures ? Le prochain paragraphe va tenter d'y répondre.

## II.2.4 Interprétation des résultats

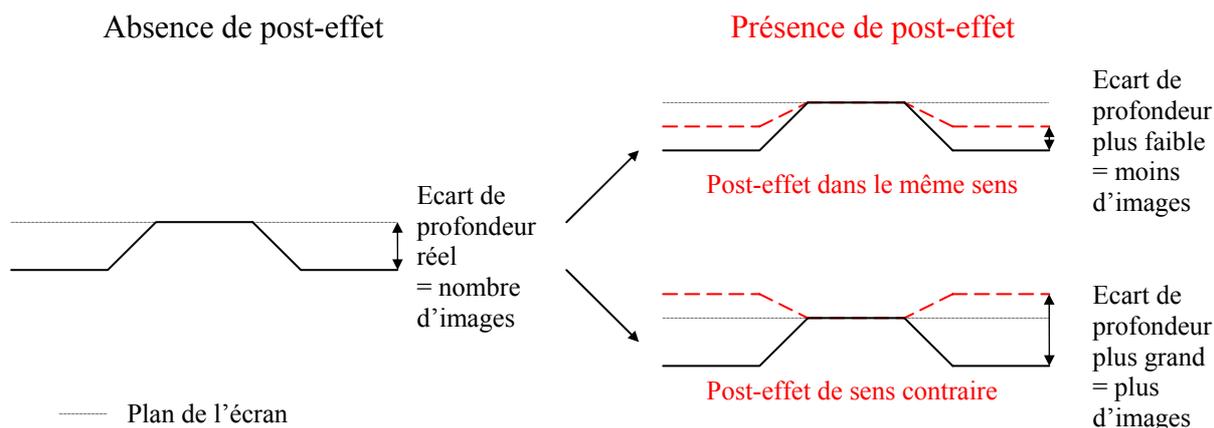
A l'exception des observateurs CP et MB, les seuils de détection d'une déformation d'un plan fronto-parallèle semblent être plus élevés quand le post-effet est de sens opposé, et plus faibles quand le post-effet est de même sens. L'explication que l'on peut donner est représentée sur les Figure 49 et Figure 50.



**Figure 49 - Représentation des deux configurations possibles en fonction du sens post-effet :** en haut, la perception de la série présentée va dans le même sens que le post-effet, ainsi pour arriver au seuil il faut moins d'images ; en bas, la perception de la série présentée va dans le sens contraire au post-effet, et pour arriver au seuil il faut plus d'images.

La déformation perçue lors du post-effet est de sens contraire à la série précédemment présentée, et de grandeur moindre. Si la série qui commence est de même sens que le post-effet, on atteindra plus rapidement le seuil de détection, il y a une facilitation par le post-effet, donc on obtiendra un seuil plus faible (Figure 49). Et, si la série qui commence est de sens opposé au post-effet, il faudra d'abord compenser le post-effet avant ensuite d'atteindre le

seuil de détection, on obtiendra donc un seuil plus élevé car il faut plus d'images disparates pour atteindre le seuil. Par rapport au seuil qui serait obtenu en l'absence complète de post-effet, si l'on considère la présence d'un post-effet, deux cas se produisent (Figure 50) : le post-effet est de même sens, alors le nombre d'images pour arriver au seuil est moindre qu'en absence de post-effet ; le post-effet est de sens opposé, les premières images disparates, servant à annuler le post-effet, viendront s'ajouter au nombre d'images qu'il aurait fallu sans ce post-effet.



**Figure 50 - Représentation des deux configurations possibles en fonction du sens de la série qui va être présentée :** à droite, le cas où il n'y a pas de post-effet ; en haut à gauche, le post-effet est de même sens que la série présentée, ainsi pour arriver au seuil il faut moins d'images ; en bas à gauche, le post-effet est de sens opposé à la série présentée, et pour arriver au seuil il faut plus d'images.

Cette explication rejoint l'analyse de Lee (1999) : dans des conditions de vision normale, la distribution des surfaces convexes ou concaves est symétrique et égale autour d'un point médian – qui définit la perception de planéité. L'exposition prolongée à une valeur va fausser la distribution et déplace le point médian. L'adaptation ou la recalibration résultante définit une nouvelle valeur de point médian de courbure – ainsi une surface courbe sera perçue comme plate.

Comme mentionné au début de cette partie, les observateurs CP et MB n'ont pas montré les mêmes résultats, puisque leurs seuils ne variaient pas significativement avec le sens du post-effet. Pour ces deux observateurs, le post-effet ne modifie pas les seuils de détection d'une déformation concave ou convexe.

D'autre part, la comparaison de l'influence du post-effet selon le type de disparité a montré une différence de comportement uniquement chez l'observateur BD qui présente une variation des seuils pour les disparités croisées, mais pas pour les disparités homonymes, en fonction du sens du post-effet.

Lors de la mesure de seuils de détection d'une déformation de surface, déformation de type concave ou convexe, la mesure précédente peut donc influencer le seuil, dans le sens

d'une diminution quand la mesure précédente était de sens de relief opposé, et dans le sens d'une augmentation avec une déformation précédente de même signe de relief. Cette influence est causée par la possible perception d'un effet consécutif de relief, ce dernier étant de sens contraire à la déformation qui vient d'être perçue.

La question qui nous intéresse pour la suite des mesures de seuils de détection d'une déformation de surface plane par méthode d'ajustement est de savoir si les post-effets doivent être supprimés. En effet, on peut se demander s'il est vraiment nécessaire de faire en sorte de ne pas avoir de post-effet du tout pendant les mesures, compte tenu du fait que la présentation aléatoire des séries permet d'avoir autant de post-effet dans un sens que dans l'autre, et ainsi les effets des post-effets se compensent naturellement sur chaque session. De plus, pour une partie des observateurs, le post-effet ne fait pas varier les résultats. Aussi le choix d'essayer de supprimer le post-effet ou non se fera-t-il au cas par cas, en fonction de la mesure que l'on réalise. Par exemple pour les mesures en stimuli constant, nous verrons que le post-effet sera éliminé à cause de la rapidité de la présentation (cf. § III.2). Par contre pour les expériences avec notre méthode d'ajustement adaptée, il n'est pas obligatoire de le supprimer. Sachant qu'il est difficile de savoir s'il n'existe plus réellement.

### **III Comparaison des seuils obtenus selon la méthode**

#### **III.1 Introduction**

La méthode d'ajustement ascendant est connue pour donner des seuils plus élevés qu'une méthode de stimuli constants. Une expérience contrôle a été réalisée afin de comparer les seuils obtenus par ces deux méthodes, notre méthode intermédiaire entre un ajustement ascendant et une méthode des limites d'une part, et une méthode de stimuli constants d'autre part. L'expérience consiste en la mesure de seuils de discrimination d'une déformation concave ou convexe d'une surface par une méthode de stimuli constants.

Le but de cette expérience est d'une part, la comparaison des seuils obtenus par la méthode d'ajustement ascendant réalisée précédemment avec les seuils obtenus avec une méthode de stimuli constants purs. Et d'autre part, le second objectif est d'évaluer la stratégie de nos observateurs : étaient-ils très prudents lors de la méthode d'ajustement ascendant dans leur jugement de perception d'une déformation ?

#### **III.2 Matériel et méthode**

La variation de la disparité horizontale se fait toujours de manière concentrique, entre un premier cercle d'excentricité  $7^\circ$  et un second cercle d'excentricité  $14^\circ$ . La valeur de la

disparité dans la couronne périphérique est constante et égale à la valeur au niveau de 14° d'excentricité.

Pour une méthode de stimuli constants, la présentation de chaque valeur de disparité étant rapide, le contrôle de la fixation n'est pas nécessaire. En effet, le temps de présentation est inférieur au temps de réalisation d'une saccade, on n'a donc pas jugé nécessaire de contrôler la fixation.

### **III.2.1 Le masque**

Nous avons mis en évidence dans le paragraphe précédent une influence des post-effets de relief sur les seuils mesurés. Ayant connaissance de ce phénomène et de par la procédure d'affichage des stimuli pour la présente méthode, nous avons préféré dans ce cas nous affranchir de tout effet consécutif. Un masque a donc été présenté entre chaque mesure. Ce masque est une succession d'images de points aléatoires présentées à une vitesse de 3 images par seconde. D'une image à l'autre, les points aléatoires sont répartis différemment, mais le niveau de gris moyen de chaque image est équivalent à celui du stimulus (pour un niveau maximal de couleur de 256, le niveau moyen de l'image est d'environ 16), de même que la luminance est équivalente (comprise entre 1 et 3 cd/m<sup>2</sup>). Les images sont équivalentes au stimulus, elles sont identiques pour chaque œil, ce sont des images de points aléatoires clairsemés, mais du fait de leur présentation successive, on peut dire que ce sont l'équivalent des sparse RDS dynamiques avec la même image binoculaire.

### **III.2.2 Les observateurs**

Nous avons sélectionné trois observateurs sans correction, satisfaisant aux critères définis dans le Chapitre 3. Deux observateurs (BD et GG) étaient habitués aux expériences psychophysiques, un autre (MB) était naïf quant à l'objectif de ces mesures. Les caractéristiques des trois observateurs (sexe, âge, écarts pupillaires, correction optique portée et stéréoaucuité) sont reportées dans le Chapitre 3.

### **III.2.3 Le protocole expérimental**

Le principe d'une *méthode de stimuli constants* est une présentation brève d'un stimulus avec un gradient de disparité défini. Cinq valeurs de gradient de disparité sont choisies en fonction des seuils obtenus par une mesure préliminaire avec une méthode des limites. Le *choix forcé* de notre méthode de stimuli constants est une qualification (concave / convexe) de la forme perçue (ou non et dans ce cas la réponse se fait au hasard). Le déroulement de l'expérience, indiquant la présentation ordonnée de l'écran noir, du stimulus, de l'écran de choix forcé et du masque, avec la durée de présentation de chacun est décrit schématiquement par la Figure 51.

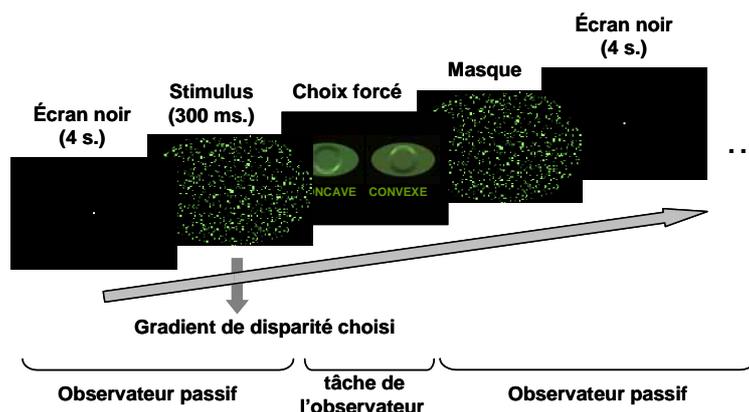


Figure 51 - déroulement de l'expérience par la méthode de stimuli constants.

Les disparités sont croisées ou homonymes. Compte tenu de la rapidité de chaque présentation, dix valeurs de gradient de disparité (cinq homonymes et cinq croisées) sont choisies. Pour chaque valeur, un grand nombre de répétitions est requis pour obtenir un pourcentage de bonnes réponses pour chaque valeur. Comme le suggère Bonnet (1986), pour la méthode des stimuli constants, il y a quelques règles à respecter : un grand nombre de répétitions (100 répétitions au minimum), les valeurs choisies pour tracer la courbe (elles doivent encadrer le seuil) et enfin les  $x$  valeurs choisies doivent être présentées aléatoirement mais chacune d'entre elles une fois avant de les répéter. Il s'agit donc d'un tirage semi-aléatoire, pour éviter plusieurs répétitions de la même valeur à la suite.

D'autre part, l'observateur pourrait avoir comme stratégie de cliquer toujours du même côté sur l'écran de choix concave/convexe quand il ne perçoit rien, ce qui produirait 100 % de bonnes réponses pour la valeur la plus faible dans une direction et 0 % dans l'autre direction. Afin d'éviter ce genre de problème, nous avons modifié notre écran de choix d'une fois sur l'autre, inverser la position des boutons une fois sur deux.

Ces mesures répétées devaient nous permettre de construire une courbe psychométrique, reliant chaque pourcentage de réponse en fonction de la valeur de la disparité horizontale, pour chacun des trois observateurs. Ainsi nous avons pu analyser leurs courbes psychométriques par rapport aux seuils précédemment obtenus avec la méthode d'ajustement ascendant.

### III.2.4 Le déroulement du test

Il est demandé à l'observateur de fixer la cible de fixation pendant toute la durée de l'expérience. L'observateur est passif pendant la présentation du masque, de l'écran de préfixation et il doit être uniquement attentif pendant la présentation du stimulus qui est brève (Figure 51). Ensuite l'observateur a pour tâche d'indiquer, à l'aide du curseur de la souris, l'un des deux choix présentés dans un menu à l'écran, la forme de la déformation perçue, convexe ou concave. La déformation perçue est un changement de profondeur par rapport au plan de

l'écran (perception d'une partie du stimulus dans un autre plan que celui de l'écran, en avant ou en arrière de l'écran).

Les valeurs de gradient de disparité choisies (Tableau 2) pour construire les courbes psychométriques sont déterminées par une méthode des limites ascendante pour chacun des observateurs (cf. Annexe 12 pour les détails de la méthode des limites).

Signe de la disparité horizontale	valeur gradient testé (arcmin./°)	
	BD	GG / MB
disparités croisées	0,0414	0,069
	0,0828	0,138
	0,1242	0,207
	0,1656	0,276
	0,207	0,345
disparités homonymes	0,0324	0,054
	0,0648	0,108
	0,0972	0,162
	0,1296	0,216
	0,162	0,27

**Tableau 2 - Définition des différentes valeurs présentées pour l'expérience des stimuli constants, selon l'observateur (BD, GG et MB).** Les valeurs de gradient ne sont pas des chiffres ronds car elles ont été choisies pour correspondre à un numéro d'image pour des séries d'images de progression 0,0138 minutes d'arc par degré pour les disparités croisées et 0,0108 minutes d'arc par degré pour les disparités homonymes.

L'expérience est répartie sur plusieurs séances qui ne doivent pas durer plus de 30 minutes, pour éviter la fatigue des observateurs. Les dix valeurs de disparités horizontales (croisées ou homonymes) étaient toutes présentées, dans un ordre aléatoire, avant d'être répétées.

### III.3 Résultats et analyse

#### III.3.1 Résultats de la méthode de stimuli constant

La présentation des cinq valeurs de gradient de disparité par signe de la disparité (croisée ou homonyme), avec 100 répétitions pour chaque valeur, permet d'obtenir soit un pourcentage de réponses dans un sens de déformation (concave / convexe) pour chacune de ces valeurs selon les réponses de l'observateur à chaque présentation, soit un pourcentage de bonnes réponses. Dans le premier cas, le pourcentage de réponses dans un sens permet d'obtenir une courbe psychométrique du pourcentage de réponse concave, ou convexe, en fonction de la valeur de disparité allant des disparités homonymes aux disparités croisées sur la même courbe. Cette courbe permet d'obtenir un seuil de discrimination entre une déformation concave ou convexe, ou un seuil de planéité. Dans le second cas, le pourcentage de bonnes réponses implique l'existence de deux courbes, une pour les disparités croisées et une seconde pour les disparités homonymes. Ces courbes devraient en principe permettre d'obtenir des seuils de détection d'une déformation concave pour la première et convexe pour la seconde. Mais dans notre cas, contrairement à une méthode permettant de tracer la courbe de sensibilité au contraste, l'élément de la tâche de discrimination (concave / convexe) et le paramètre variable mesuré (signe de la disparité horizontale : croisé / homonyme) ne sont pas

dissociables. Par opposition, lors de la mesure de sensibilité au contraste spatial par une méthode de stimuli constants, l'élément de la tâche de discrimination est l'orientation d'un réseau et le paramètre variable mesuré est le contraste du réseau. Aussi, nous ne pouvons donc pas mesurer précisément des seuils de discrimination concave et de discrimination convexe séparément, ceux-ci sont obligatoirement liés. C'est pourquoi la méthode utilisée nous a permis d'obtenir une unique courbe de discrimination concave / convexe ou de planéité.

Le sens de déformation choisi pour le pourcentage de réponses en ordonnées des représentations graphiques est « concave », correspondant aux disparités croisées. Le choix forcé oblige l'observateur à qualifier le sens de la déformation perçue : l'observateur devrait avoir approximativement 0 % de réponse « concave » pour des disparités homonymes de valeurs élevées (en valeur absolue) donnant lieu à la perception correcte de la déformation convexe. L'observateur devrait avoir approximativement 100 % de réponses « concave » pour des disparités croisées de valeurs élevées donnant lieu à la bonne perception de la déformation. A partir des pourcentages de réponses « concave » affectés à chaque valeur de gradient de disparité, on peut représenter sous forme graphique le pourcentage de réponses « concave » en fonction de la valeur du gradient de disparité horizontale. Les disparités homonymes seront notées en valeurs négatives et les disparités croisées en valeurs positives. Les dix points de chaque graphique peuvent être reliés, par approximation, par une courbe sigmoïde, ou courbe psychométrique. On aura ainsi une sigmoïde comprise entre 0 % et 100 % pour les ordonnées, correspondant aux valeurs maximales de disparités, respectivement homonymes et croisées.

Pour chaque observateur, un graphique peut ainsi être tracé pour l'ensemble des dix valeurs de disparités (croisées et homonymes). Les dix points de chaque graphique vont être interpolés par la courbe psychométrique de meilleure approximation.

La courbe psychométrique est une sigmoïde d'équation : 
$$y = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)}}$$

En Annexe 13 se trouve le détail des différents paramètres ( $a$ ,  $x_0$  et  $b$ ) définissant les courbes psychométriques de meilleure approximation pour chaque observateur. De même, l'algorithme ayant permis l'ajustement des résultats par une courbe sigmoïde est précisé. Les courbes psychométriques correspondant à chaque observateur sont représentées dans la Figure 52. Ces courbes indiquent la sensibilité aux disparités croisées et homonymes, mais ne donnent pas une valeur de seuil de détection des disparités croisées ou homonymes. Il s'agit d'une capacité à discriminer le concave et le convexe. Cette dernière information est donnée par la pente de la courbe au voisinage de 50 % de réponses « concave ».

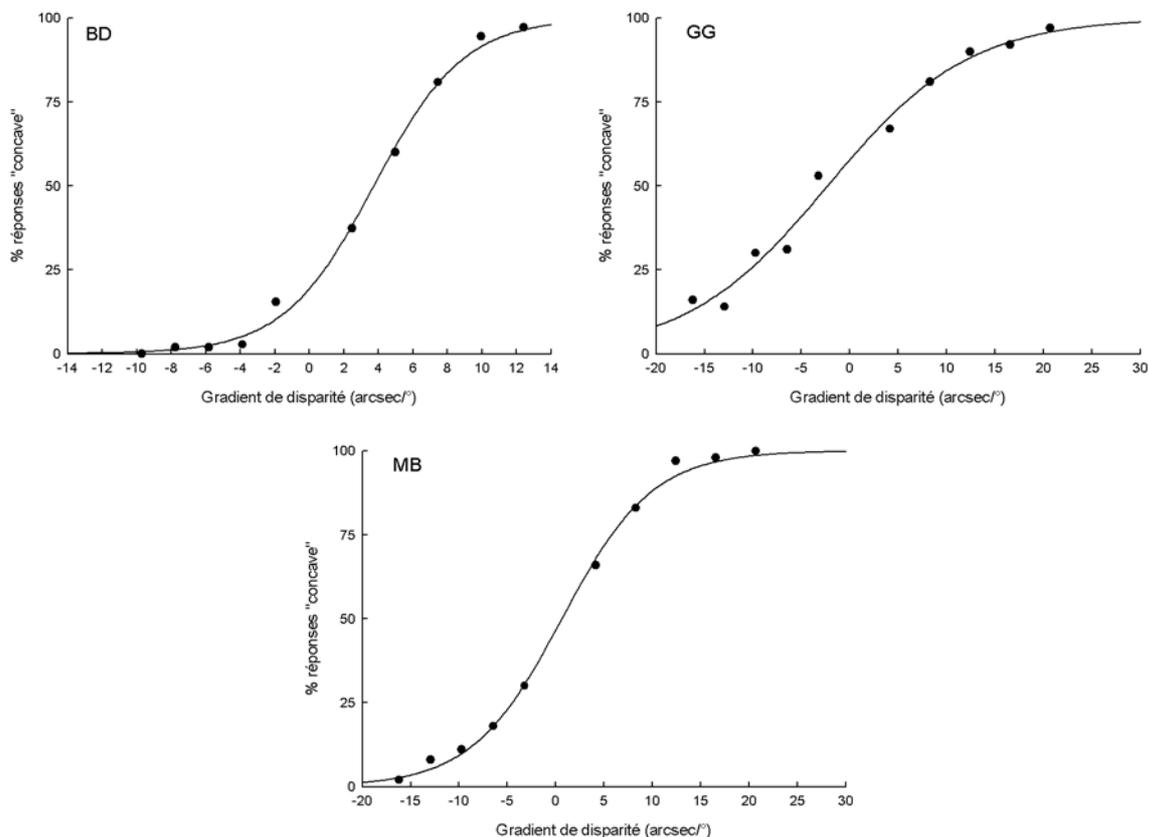


Figure 52 - Courbes psychométriques du pourcentage de réponses « concave » en fonction du gradient de disparité, pour chaque observateur.

Pour chacune des courbes de meilleure approximation, les paramètres importants sont : le biais, correspondant à  $x_0$  ou la valeur du gradient de disparité pour laquelle on obtient 50 % de réponses « concave » ; et la pente de la courbe au voisinage des 50 % de réponses « concave ». Le Tableau 3 résume ces paramètres pertinents pour chaque observateur.

Observateur	Seuils méthode d'ajustement		Stimuli constants			
	Disparités croisées (arcsec/°)	Disparités homonymes (arcsec/°)	Biais (arcsec/°)	Pente	% Seuil ajustement croisées	% Seuil ajustement homonymes
BD	41,12	-26,56	3,72	9,56	100,00	0,00
GG	47,2	-38,42	-2,31	3,41	99,88	0,72
MB	44,16	-32,83	0,63	5,35	99,99	0,08

Tableau 3 - Paramètres (biais, pente) définissant la courbe psychométrique et position des seuils obtenus par la méthode d'ajustement ascendant sur la courbe psychométrique obtenue avec la méthode de stimuli constants pure, pour chaque observateur : les disparités croisées sont notées en valeurs positives et les disparités homonymes en valeurs négatives.

D'une part, le biais, correspondant à 50 % de réponses « concave » ou 50 % de réponses « convexe », représente une réponse au hasard, entre concave et convexe. On peut donc supposer qu'au voisinage de ces 50 % de réponses concave ou convexe la valeur du gradient de disparité correspond à une perception de plan fronto-parallèle. Le gradient pour 50 %, ou le biais, serait donc le seuil de planéité. Cette valeur de biais est assez différente d'un observateur à l'autre : pour MB, elle est proche de zéro, qui correspond effectivement au

plan fronto-parallèle. Ainsi MB aurait une perception de planéité proche du vrai plan. Par contre, les observateurs BD et GG présentent des biais différents de zéro, mais de valeurs opposées. Pour BD ce biais est de 3,72 arcsec/°, donc de disparité croisée, indiquant une perception plutôt convexe du plan de l'écran (correspondant à zéro disparité). Pour GG, ce biais est au contraire de -2,31 arcsec/° (disparité homonyme), déplaçant la valeur nulle de disparité vers des pourcentages supérieurs à 50 % de réponses « concave », donc une perception plutôt concave du plan fronto-parallèle. Ces résultats se rapprochent d'une détermination de plan fronto-parallèle apparent qui montrerait que la distance abathique se trouve en avant de la distance de l'écran pour l'observateur BD et en arrière pour l'observateur GG (cf. Chapitre 1).

D'autre part, les pentes des courbes, au voisinage de 50 % de réponses « concave », sont variables selon les observateurs : d'une pente importante pour BD (9,56), à une pente plus faible pour GG (3,41), en passant par une pente moyenne pour MB (5,35). Ces résultats, en termes de pente, indiquent que BD a une capacité à discriminer le concave du convexe assez fine, cette capacité de discrimination concave / convexe est moins fine pour MB et encore moins pour GG. En d'autres termes, la zone de perception de planéité est très peu étendue chez l'observateur BD, elle l'est plus pour MB et elle est étendue pour GG.

Enfin, à partir des équations des courbes psychométriques, on peut situer les seuils obtenus précédemment avec la méthode d'ajustement ascendant sur les différentes courbes et obtenir le pourcentage de réponses « concave » correspondant. Le Tableau 3 rappelle les différents seuils obtenus par la méthode d'ajustement, pour les disparités croisées et pour les disparités homonymes, et en précise le pourcentage précédemment décrit, relatif à chaque courbe. Pour les disparités croisées, pour les trois observateurs, les pourcentages de réponses « concave » sont très proches de 100 %. Pour les disparités homonymes, les pourcentages sont très proches de 0 % pour BD et MB, mais il est très légèrement supérieur pour GG (0,72 %). Les seuils obtenus avec la méthode d'ajustement ascendant correspondent à plus de 99 % de bonnes réponses (concave ou convexe). Ces seuils se situent donc dans une zone de certitude de perception dans le bon sens.

En conclusion de cette expérience de stimuli constants : les seuils de perception de planéité ne correspondent pas toujours exactement à une disparité nulle. Par exemple, l'observateur BD aurait une perception plutôt convexe du plan fronto-parallèle, ce qui est confirmé par son impression personnelle de perception déjà convexe de stimulus sans disparité. L'observateur GG aurait, lui, une perception légèrement concave du plan fronto-parallèle. On peut également ajouter que, pour l'observateur BD, la pente de sa courbe psychométrique étant élevée, le point de disparité nulle a un pourcentage de réponses « convexe » (1 - pourcentage de réponses « concave ») élevé (environ 81 %). Alors que pour GG, la pente étant plus faible, un gradient de disparité nul ne va pas présenter un pourcentage

suffisamment élevé pour dire que le plan fronto-parallèle est perçu comme concave, ce n'est qu'une tendance concave. Les pentes permettent donc d'indiquer la largeur de la zone de perception de planéité ou la capacité à discriminer le concave du convexe. Pour BD, la zone de perception de planéité est très courte et la discrimination est très serrée, contrairement à GG et MB. Les seuils obtenus par la méthode d'ajustement ascendant se trouvent être à des pourcentages dits de sécurité (zone de 100 % de bonnes réponses).

### III.3.2 Comparaison avec une méthode de stimuli constants ascendants

Une seconde expérience contrôle a été réalisée en parallèle avec une méthode intermédiaire entre la méthode d'ajustement ascendant et les stimuli constants. La description de la méthode et les résultats de cette expérience se trouvent en Annexe 12. A la place des stimuli de valeur de disparité fixée avec une durée de présentation brève (stimuli constants classiques), cette méthode a été aménagée en modifiant les stimuli de sorte qu'ils atteignent progressivement une valeur de gradient de disparité définie (appelée méthode de stimuli constants ascendants). Pour cette comparaison de deux méthodes de stimuli constants, on appellera la première « stimuli constants purs ». Les différents paramètres permettant de définir la capacité à discriminer la déformation concave de la déformation convexe pour les deux expériences sont regroupés dans le Tableau 4.

Observateur	Seuils méthode d'ajustement		Stimuli constants purs				Stimuli constants ascendants			
	Disparités croisées (arcsec/°)	Disparités homonymes (arcsec/°)	Biais (arcsec/°)	Pente	% Seuil ajustement croisées	% Seuil ajustement homonymes	Biais (arcsec/°)	Pente	% Seuil ajustement croisées	% Seuil ajustement homonymes
BD	41,12	-26,56	3,72	9,56	100,00	0,00	3,16	5,30	99,97	0,18
GG	47,2	-38,42	-2,31	3,41	99,88	0,72	-1,49	3,01	99,72	1,16
MB	44,16	-32,83	0,63	5,35	99,99	0,08	-4,36	4,96	99,99	0,35

**Tableau 4 - Comparaison des paramètres définissant les courbes psychométriques obtenues par les deux méthodes de stimuli constants et positions des seuils obtenus par la méthode d'ajustement ascendant sur ces courbes.**

Les résultats des deux expériences contrôles de stimuli constants semblent relativement proches. Les seuils obtenus par la méthode d'ajustement ascendant se situent à des pourcentages de bonnes réponses supérieurs ou égaux à 99 % pour les deux expériences. Entre les deux méthodes de stimuli constants, ces pourcentages de bonnes réponses correspondant aux seuils de la méthode d'ajustement ne sont pas significativement différents (Test de Wilcoxon :  $p = 0,29$  pour les disparités croisées ;  $p = 0,11$  pour les disparités homonymes). Ces pourcentages sont simplement plus étalés dans le cas de la méthode des stimuli constants ascendants, mais semblables entre les observateurs. De même, si l'on compare les paramètres des courbes psychométriques, on n'observe pas de différences significatives des biais et pentes entre les deux méthodes de stimuli constants (Test de Wilcoxon :  $p = 0,59$  pour le biais ;  $p = 0,11$  pour la pente). Pour le biais, on notera que seul MB montre une différence entre les valeurs de chaque méthode. Par contre, la préférence

convexe observée chez BD pour les stimuli constants purs est confirmée même en tenant compte de la pente qui est forte, et devient plutôt une tendance pour les stimuli constants ascendants, juste indiquée par le biais. Enfin, GG aurait une tendance vers une préférence concave indiquée par les biais pour les deux méthodes, non confirmée par les pentes, également dans les deux cas.

Ainsi, les deux expériences d'une même méthode (stimuli constants et choix forcé), mais avec des stimuli différents (non de textures différentes mais de « temps de présentation » différents) mettent en évidence des éléments relativement semblables pour les trois observateurs.

### **III.4 Discussion des résultats**

Les deux expériences de stimuli constants réalisées montrent des courbes relativement semblables (au niveau de leur forme) pour chacun des observateurs, aussi peuvent-elles se résumer en une seule, la méthode de référence : la méthode de stimuli constants purs. La première observation est que les seuils obtenus avec une méthode d'ajustement sont des valeurs de gradient de disparité correspondant à plus de 99 % de bonnes réponses. Les seuils de notre méthode d'ajustement ascendant sont donc très supérieurs aux seuils d'une méthode de stimuli constants. Notons qu'il est bien connu que ce type de méthode donne des seuils plus faibles qu'une méthode d'ajustement. Il faut noter également que notre méthode d'ajustement ascendant avait la particularité d'être plus un intermédiaire entre une méthode des limites et une méthode d'ajustement : l'observateur n'ajuste pas exactement à son seuil, car il ne peut revenir en arrière, mais il arrête l'augmentation de la disparité quand il perçoit la déformation en profondeur. Aussi était-il attendu d'avoir des seuils plutôt élevés pour les raisons que nous allons évoquer à présent.

Les observateurs pouvaient être prudents et attendre d'être certains du sens de la déformation, ou encore l'existence d'un post-effet mis en évidence précédemment pourrait ajouter à l'observateur une incertitude dans la décision de perception de déformation. Une première explication des seuils plus élevés pourrait donc être l'adaptation couramment observée avec une méthode d'ajustement ascendant et la possibilité d'un niveau de confiance élevé de la part de l'observateur dans cette tâche. Pourtant les observateurs montrent des seuils relativement constants avec les répétitions, ils ont donc dû garder tout au long de l'expérience la même stratégie dans leur décision. Nous avons vu que les seuils d'ajustement ascendant correspondent à plus de 99 % de bonnes réponses (concave ou convexe) pour les stimuli constants. On considère que les seuils de discrimination correspondent à 75 % de bonnes réponses. Alors, si l'effet n'était dû qu'à un niveau de confiance élevé (sans phénomène d'adaptation), les seuils de la méthode d'ajustement signifieraient que les observateurs attendent d'atteindre un niveau de confiance de 99 %, qui ne semble pas

plausible compte tenu de la consigne qui leur était donné de répondre le plus rapidement possible. Ainsi, ce pourcentage élevé de bonnes réponses pour les valeurs de seuils de la méthode d'ajustement suggèrent plutôt que l'effet d'adaptation joue un rôle important.

Ces écarts de seuils entre les deux méthodes montrent ainsi la différence entre une déformation juste perceptible (qui serait mesurée avec des stimuli constants et serait très faible), et une déformation plutôt « gênante » (mesurée avec l'ajustement ascendant). Ces deux types de déformations peuvent être rapprochés de ce qui se produit avec le port de verres correcteurs : des déformations peuvent être perçues dès que l'on chausse les lunettes, elles dépendront des seuils juste perceptibles, et peuvent disparaître avec le temps de port donc l'habitude ; mais il y a surtout les déformations qui ne disparaissent pas et deviennent réellement gênantes, si elles ne disparaissent pas c'est qu'elles sont supérieures à des seuils mesurés avec une méthode d'ajustement.

D'autre part, les différences de seuils entre la méthode d'ajustement et la méthode de stimuli constants peuvent s'expliquer également par le phénomène d'hystérésis : la perception de plan fronto-parallèle (ou presque) peut être maintenue, par augmentation progressive de la disparité, jusqu'à une valeur limite (mesurée par la méthode d'ajustement) plus élevée que la valeur obtenue quand la disparité présentée isolément (mesurée par la méthode de stimuli constants).

De plus, la méthode de stimuli constants a permis de mettre en évidence le fait que le plan de l'écran ou plan fronto-parallèle pouvait être perçu légèrement convexe ou concave par certains observateurs. Ce type d'observation avait été mentionné par quelques observateurs lors des expériences avec la méthode d'ajustement pour la première image sans disparité. Ce phénomène peut impacter les seuils pour la mesure en stimuli constants. Pour la mesure en ajustement ascendant, même si l'observateur pouvait avoir une perception légèrement déformée du plan de l'écran, la mesure d'une déformation perçue comme « gênante » reste fiable. Cette perception déformée du plan fronto-parallèle peut néanmoins renforcer l'incertitude que peut avoir l'observateur sur la décision de répondre.

Les différences précédemment observées entre les disparités croisées et les disparités homonymes ne peuvent pas être mises en évidence par ces dernières expériences. Ces expériences peuvent juste indiquer une préférence concave ou convexe d'un plan fronto-parallèle, cette préférence pouvant expliquer des seuils plus ou moins faibles dans un sens ou dans l'autre : par exemple, la préférence convexe de BD va pouvoir expliquer des seuils inférieurs en disparités homonymes. Il faut préciser que pour la présente expérience, les valeurs de gradient de disparité sont très faibles, or la résolution angulaire de l'affichage grand champ réduit la précision.

En conclusion, les seuils de notre méthode d'ajustement sont donc bien supérieurs à ceux que l'on aurait obtenus avec une méthode de stimuli constants. Plusieurs raisons justifient le choix de la méthode d'ajustement :

(1) la méthode d'ajustement nous a permis de collecter un grand nombre de données avec la possibilité de modifier certains paramètres (les excentricités délimitant la zone de gradient de disparité) pour des expériences demandant moins de temps aux observateurs ;

(2) L'intérêt de ces mesures par la méthode d'ajustement ascendant n'était pas tant la valeur absolue de la disparité, mais plus les variations de cette valeur (selon l'excentricité ou le signe de la disparité) ;

(3) les méthodes de stimuli constants mesurent des seuils si faibles qu'on se trouve limité par la résolution de notre matériel, les conditions étudiées étant sur un large champ visuel. La précision de ces mesures se trouve donc impactée par la limite de résolution ;

(4) les méthodes de stimuli constants utilisées ne permettent pas d'obtenir des seuils de détection d'une déformation concave ou convexe puisque nous n'avons aucun moyen de dissocier l'élément de la tâche de discrimination (concave / convexe) du paramètre variable mesuré (signe de la disparité : croisée / homonyme) ;

(5) les conditions expérimentales de la méthode d'ajustement se rapprochent plus de conditions naturelles que la méthode de stimuli constant : en effet les disparités apparaissent rarement soudainement dans le champ visuel, et les individus sont rarement contraints comme le teste la méthode de stimuli constants ;

(6) pour une application aux verres ophtalmiques, ce sont les déformations gênantes pour les porteurs qui vont nous intéresser. C'est en effet ce que l'on mesure avec la méthode d'ajustement. Les déformations juste perceptibles peuvent être celles que les porteurs peuvent observer immédiatement en essayant une nouvelle prescription, mais auxquelles ils s'adaptent très rapidement. Par contre, si les disparités sont supérieures aux seuils de tolérance (méthode d'ajustement), ces déformations pourront devenir gênantes car le porteur les perçoit constamment, il ne s'y habitue pas. Les verres ophtalmiques introduisent des gradients de disparités dans tout le champ visuel binoculaire qui peuvent produire des déformations de la perception tridimensionnelle, si ces déformations sont perçues cela signifie qu'elles ne sont pas tolérées par le porteur.

Une remarque importante peut être faite au regard de l'analyse de l'influence des post-effets (paragraphes précédents). Lors des mesures de seuils par la méthode d'ajustement ascendant, nous avons mis en évidence la présence de post-effets de relief. Nous avons notamment étudié la possibilité d'une influence de post-effets dits « infraliminaires » car consécutifs à une présentation de valeur jugée infraliminaire de gradient de disparité. Au vue

des présents résultats, nous pouvons situer ces gradients dits « infraliminaires » sur nos courbes psychométriques : pour les disparités croisées, la valeur minimale retenue était 9,93 arcsec/°, et pour les disparités homonymes, la valeur minimale était 6,84 arcsec/°. 9,93 arcsec/° correspond dans tous les cas et pour les trois observateurs à un pourcentage supérieur à 80 % de bonnes réponses. Par contre, - 6,84 arcsec/° est supérieur à 80% de bonnes réponses pour BD et MB et environ égal à 65 % de bonnes réponses pour GG. Les valeurs de gradient de disparité considérées comme infraliminaires étaient supérieures à 9,93 arcsec/° pour les disparités croisées, elles n'étaient infraliminaires que pour l'expérience d'ajustement, par contre ces valeurs pouvaient être perçues dans la bonne direction selon une méthode de stimuli constants. Pour les valeurs supérieures 6,84 arcsec/° des disparités homonymes, elles devaient pouvoir être perçues dans la plupart des cas. Seules les valeurs approchant 6,84 pouvaient être effectivement infraliminaires pour GG et MB (par rapport à la méthode de stimuli constants modifiée plus proche de la méthode d'ajustement ascendant). D'une manière générale, la plupart des valeurs de gradients considérées comme infraliminaires l'étaient uniquement pour la méthode d'ajustement, mais ne l'étaient pas pour une méthode de stimuli constants.

#### ***IV Influence de la vitesse d'affichage avec une méthode d'ajustement***

La vitesse d'introduction des disparités pourrait expliquer les différences de seuil entre une méthode de stimuli constants où les seuils sont très faibles et la vitesse d'introduction très rapide (si on considère que le seuil est atteint en 300 ms, qui est le temps de présentation), et une méthode d'ajustement ascendant où les seuils sont plus faibles avec une vitesse d'apparition plus lente (dans notre cas 3 images/s). Par exemple, la valeur de gradient de disparité, correspondant au seuil, qui apparaît dans le premier cas en 300 ms, met environ 3 secondes à apparaître progressivement dans le second cas. Pour tester cette hypothèse, une expérience contrôle a été mise en place avec des conditions expérimentales similaires, seule la vitesse d'apparition varie.

##### **IV.1 Protocole expérimental**

La méthode psychophysique utilisée pour mesurer les seuils de discrimination d'une déformation d'une surface plane est la méthode d'ajustement ascendant que nous avons décrite dans le Chapitre 3 de méthodologie générale (Figure 53). Il s'agit d'un compromis entre une méthode d'ajustement ascendant et une méthode des limites.

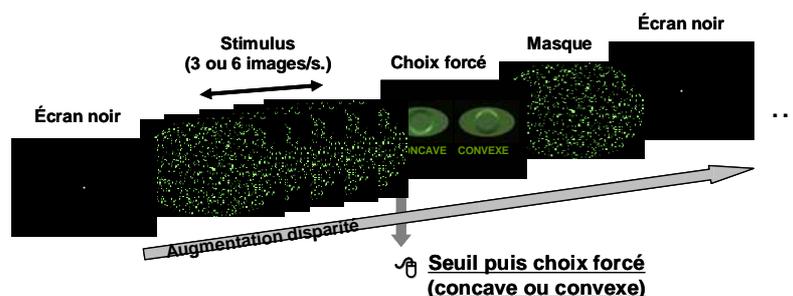


Figure 53 - Déroulement de l'expérience sur la vitesse d'apparition : les images sont introduites avec une vitesse de 3 images par seconde ou de 6 images par seconde.

Entre chaque mesure de seuil est présenté un masque (décrit dans le paragraphe III.2.1 de ce chapitre) pour limiter les effets consécutifs de relief que pourrait produire la mesure précédente. A la suite de ce masque, et avant l'introduction du stimulus servant à la mesure, l'image noire est affichée pendant 4 secondes, pour effacer les éventuelles post-images.

Les disparités introduites au stimulus sont modifiées progressivement dans le temps, l'observateur arrête le défilement des images quand il perçoit une déformation concave ou convexe. Ensuite il doit, par un choix forcé, indiquer si la déformation perçue était concave ou convexe. Cette expérience nécessitera le contrôle de la fixation par électro-oculographie.

Pour les deux conditions de vitesse (3 et 6 images par seconde), le paramètre mesuré est le gradient de disparité horizontale entre les excentricités 7 et 14°, les disparités horizontales sont croisées ou homonymes. Le paramètre qui varie entre ces deux conditions est la vitesse de défilement des images. Pour la condition n°1, la vitesse est de 3 images par seconde et pour la condition n°2, la vitesse est de 6 images par seconde.

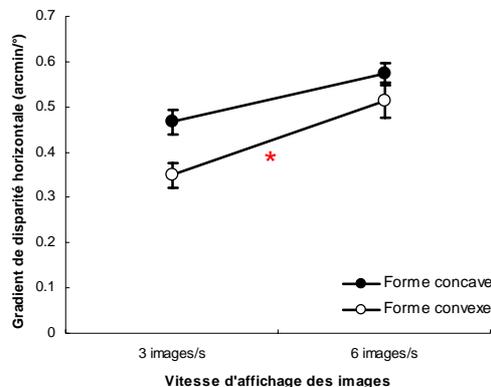
Neuf répétitions ont été réalisées, six répétitions ont été retenues pour l'analyse des résultats. Les trois premières répétitions ayant été considérées comme de l'entraînement. L'analyse des résultats tient compte du temps de réaction : on considère qu'il y a environ 200 ms de temps de réaction pour la perception auquel il faut ajouter 200-300 ms pour la réponse motrice (clic de l'index sur la souris). Il faut donc retirer 2 images au moment du déclenchement du seuil pour obtenir l'image où la détection a eu lieu pour une vitesse d'affichage de 3 images/s, et 4 images pour la vitesse d'affichage de 6 images/s.

Les observateurs sont au nombre de cinq, il s'agit de BR, GG, HR, JL et MB, dont les caractéristiques se trouvent dans le Chapitre 3.

## IV.2 Résultats et discussion sur la vitesse d'affichage

Les seuils mesurés en gradient de disparité horizontale sont significativement différents en fonction de la vitesse d'apparition des disparités (ANOVA :  $F_{1,6} = 22,2$  ;

$p = 0,009^{15}$ ). De même, cette différence est retrouvée pour les déformations concaves et convexes, comme l'indique la Figure 54. En effet, l'ANOVA ne montre pas d'interaction significative entre la vitesse et le signe des disparités horizontales, croisées / homonymes ( $F_{1,6} = 1,73$  ;  $p = 0,20^{15}$ ).



**Figure 54 - variation des seuils en gradient de disparité horizontale en fonction de la vitesse d'affichage ou vitesse d'apparition des disparités, selon le signe de la disparité horizontale (croisée/ forme concave ou homonyme/forme convexe). L'astérisque rouge indique une différence significative au seuil de 0,05 entre les deux valeurs considérées. Les barres d'erreur correspondent à  $\pm$  l'erreur-type.**

La Figure 54 indique que les seuils en gradient de disparité horizontale, croisée comme homonyme, augmentent avec l'augmentation de la vitesse. Notons que pour les disparités homonymes, l'augmentation des seuils avec la vitesse est significative (test post-hoc :  $p = 0,02^{16}$ ), alors qu'elle ne l'est pas pour les disparités croisées ( $p = 0,18^{16}$ ). D'autre part, les différences de seuils observées entre les disparités croisées et les disparités homonymes dans les expériences précédentes sont retrouvées uniquement pour la vitesse d'affichage de 3 images/s ( $p = 0,017^{16}$ ), étant la même vitesse que celle appliquée précédemment. Par contre, pour une vitesse plus rapide (6 images/s), la différence de seuil n'est pas significative ( $p = 0,11^{16}$ ). Les seuils de discrimination d'une forme concave/convexe sont donc globalement plus importants quand les disparités apparaissent plus rapidement, mais particulièrement pour les formes convexes (disparités homonymes).

*Remarque :* les six répétitions gardées pour l'analyse ne montrent pas de variations significatives ( $F_{5,30} = 0,60$  ;  $p = 0,7^{15}$ ), on observe donc peu de variations intra-individuelles dans l'ensemble.

La vitesse de 6 images/s correspond à une vitesse intermédiaire entre la vitesse d'affichage à 3 images/s utilisée jusqu'alors et la vitesse d'apparition d'une méthode de stimuli constants : la présentation pendant 300 ms d'une valeur de disparité, pouvant

<sup>15</sup> ANOVA mesures répétées, variable dépendante : gradient de disparité horizontale en valeur absolue ; facteur intra : répétitions (6) ; variables catégorielles : observateurs, signe de la disparité horizontale et vitesse d'affichage des images disparates.

<sup>16</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité horizontale en valeur absolue ; effets : signe de la disparité horizontale \* vitesse d'affichage des images disparates.

correspondre à la neuvième image par exemple, peut être considérée comme affichée avec une vitesse de 29 images par seconde. La première observation peut être sur la différence de sensibilité selon le signe des disparités horizontales observée avec la méthode d'ajustement et pour une vitesse de 3 images/s. Cette différence n'est pas retrouvée pour une vitesse de 6 images/s, ni avec une méthode de stimuli constants. C'est en cela que l'augmentation de la vitesse rapproche la méthode d'ajustement d'une méthode de stimuli constants. Des différences de seuils de discrimination en profondeur sont donc mises en évidence avec une apparition progressive lente des disparités.

La méthode d'ajustement peut modifier à chaque image le niveau de référence de l'observateur, en fonction des dernières images disparates présentées. On peut faire l'hypothèse suivante : le cerveau calcule un niveau de référence sur les disparités vues pendant les 2 s précédentes (par exemple), il moyenne ces disparités qu'il compare avec la nouvelle image disparate qui lui est présentée, jusqu'à ce qu'il perçoive une différence entre les disparités non perçues moyennées et la nouvelle valeur de disparité. Si ce moyennage se fait sur une fenêtre temporelle fixe, alors il fera une moyenne sur un plus grand nombre d'images pour un affichage de 6 images/s que pour un affichage de 3 images/s. Dans ce cas, les seuils devraient être plus élevés pour un affichage plus lent, la moyenne des 6 dernières images (pour la vitesse de 3 images/s) sera plus élevée donc plus proche de la valeur avec laquelle elle est comparée. Cette hypothèse n'explique donc pas les résultats obtenus.

Par ailleurs, afin de comparer ces trois vitesses, considérons une approximation de seuil obtenu avec la méthode de stimuli constants, soit environ 0,1 minute d'arc/° en 300 ms, perçu avec 75 % de bonnes réponses. La même valeur de 0,1 minute d'arc/°, avec la méthode d'ajustement ascendant et un affichage de 3 images/s (correspondant environ à la huitième image), est présentée après 3 s, et n'est pas perçue. De même, avec une vitesse d'affichage de 6 images/s, cette valeur est présentée après environ 2 s, et n'est pas également pas perçue. Comparativement, la réponse moyenne pour 3 images/s a lieu au bout d'environ 11 s ( $11,26 \pm 0,67$  s pour les disparités croisées et  $10,76 \pm 0,86$  s pour les disparités homonymes). La réponse moyenne pour 6 images/s se situe à environ 8 s ( $7,54 \pm 0,33$  s pour les disparités croisées et  $8,67 \pm 0,66$  s pour les disparités homonymes). On peut calculer un temps de « réponse », qui signifierait que les observateurs ont un même seuil quelle que soit la vitesse de présentation, mais c'est le temps de réaction qui donne des valeurs finalement différentes. Ce temps de réponse est donc le même pour les deux vitesses. On a ainsi l'équivalence suivante, qui signifierait que les seuils sont les mêmes quelle que soit la vitesse :  $2k(8 - \tau) = k(11 - \tau)$ , avec k le nombre d'images (la vitesse de 6 images par seconde affiche deux fois plus d'images que la vitesse de 3 images par seconde sur le même temps) et  $\tau$  le temps de « réponse ». Dans ce cas, le temps de réponse serait de 5 s, ce qui semble trop important pour être une explication de la différence de seuils.

Donc, en augmentant la vitesse d'affichage des images disparates, la détection se produit plus tôt, mais pour des images de valeur de disparité plus élevée. Il existe donc une influence de la vitesse d'affichage ou d'apparition des disparités sur la mesure de seuil.

Les différences de seuils entre la méthode de stimuli constants et la méthode d'ajustement ascendant sont probablement dues à la méthode elle-même qu'à la vitesse d'apparition de l'image disparate. Il s'agit du phénomène d'adaptation connu dans les méthodes d'ajustement qui entraîne ces augmentations de seuil (Bonnet, 1986). L'adaptation à un changement progressif est d'autant plus longue et le changement plus difficile à percevoir qu'il apparaît rapidement. La perception du changement semble donc plus difficile en augmentant la vitesse d'affichage.

Le temps de réponse peut justifier en partie cette différence de seuils entre les deux vitesses, mais il ne justifie pas à lui seul ces résultats. La seule autre explication qui peut justifier l'augmentation de seuil avec la vitesse d'affichage serait donc que l'on perçoit moins facilement les mêmes changements quand ils apparaissent plus rapidement. Les images restent affichées 300 ms chacune pour la vitesse de 3 images/s, ce temps est suffisant pour la discrimination de valeurs faibles de gradient de disparité puisqu'il s'agit du temps de présentation de la méthode de stimuli constants. Par contre, pour une vitesse de 6 images/s, les images restent affichées 167 ms, ce qui n'est peut-être pas suffisant pour une discrimination précise. Les études antérieures ont montré que pour des temps de présentation brefs (environ 167 ms), les observateurs peuvent être insensibles aux disparités croisées et/ou aux disparités homonymes (Richards, 1971 ; Patterson et Fox, 1984). Par contre pour des temps de présentations plus longs, les observateurs sont sensibles aux disparités quel que soit leur signe. Ceci pourrait donc expliquer la différence de seuils obtenue en fonction de la vitesse d'affichage, et également le fait que cette différence ne soit significative que pour les disparités homonymes.

En conclusion, pour une méthode d'ajustement ascendant dans la discrimination en profondeur des disparités binoculaires, il est préférable d'utiliser une vitesse de 3 images/s.

## ***V L'application aux verres ophtalmiques***

### **V.1 Synthèse des résultats en vue de l'application aux verres ophtalmiques**

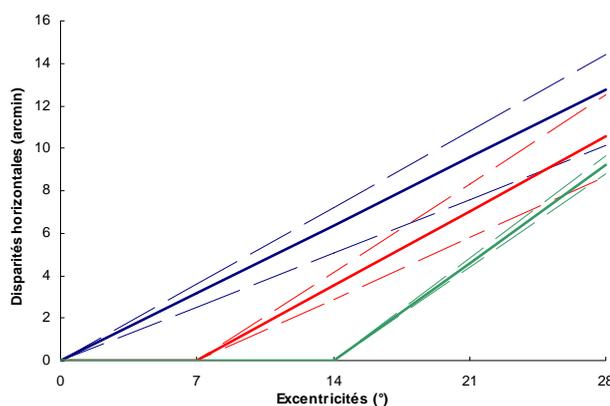
Les résultats des différentes expériences nous servent également à analyser les disparités horizontales introduites par les verres ophtalmiques. Pour cela, un récapitulatif synthétique des valeurs de seuils mesurés est nécessaire, afin de proposer une manière simple d'étudier les disparités des verres.

Les seuils obtenus sont mesurés en gradient de disparité horizontale entraînant une discrimination de déformation de surface, en fonction de la position de ce gradient concentrique dans le champ visuel. Les valeurs de gradient mesurées avec une méthode intermédiaire entre un ajustement ascendant et une méthode des limites sont des seuils de tolérance, par comparaison aux seuils obtenus avec une méthode de stimuli constants qui sont des valeurs de déformations juste perceptibles. Les seuils de tolérance dépendent de l'excentricité à partir de laquelle est appliqué le gradient de disparité horizontale. Le Tableau 5 résume les valeurs moyennes pour ces seuils de discrimination en fonction de l'excentricité, obtenues par la méthode d'ajustement lors de l'expérience de comparaison de deux stimuli décrite dans le Chapitre 3<sup>17</sup>.

Disparités horizontales	$a$ (°)	Gradient moyen (arcmin/°)	Erreur-type
Disparités croisées	0	0.536	0.0022
	7	0.576	0.002
	14	0.653	0.0025
Disparités homonymes	0	0.375	0.0015
	7	0.431	0.0019
	14	0.663	0.003

**Tableau 5 - Seuils de tolérance aux disparités horizontales, en termes de gradient de disparité (en minute d'arc/°), mesurés avec la méthode d'ajustement ascendant, en fonction du signe de la disparité (croisée ou homonyme) et en fonction de l'excentricité de départ.**

Les seuils de tolérance en gradient de disparité horizontale peuvent être également représentés sous la forme de droites de disparité horizontale en fonction de l'excentricité (Figure 55).



**Figure 55 - Graphique représentant les gradients de disparité par la pente des droites de la disparité en fonction de l'excentricité au seuil de discrimination d'une déformation :** en bleu pour les variations de disparité dont le point de départ est le point de fixation ; en rouge les variations dont l'excentricité de départ est 7° ; en vert, les variations d'excentricité de départ 14°. Les lignes pleines correspondent au seuil moyen et les lignes en pointillé les seuils en disparité croisée et homonyme  $\pm$  l'erreur-type.

<sup>17</sup> Seules les valeurs de seuils pour le sparse RDS ont été retenues pour calculer ces valeurs moyennes, compte tenu de la préférence pour ce stimulus.

Les pentes des droites correspondent aux gradients de disparité. Chaque droite présente une enveloppe représentant la plage de valeur entre les disparités croisées et les disparités homonymes. L'enveloppe de ces droites semble décrire approximativement une parabole. Notons que, pour un point quelconque, le gradient de disparité correspond à la dérivée de la disparité en ce point (dans ce cas, l'angle tend vers 0, cf. Chapitre 1). La dérivée d'une fonction parabolique est une fonction linéaire. En effet, les résultats moyens en gradient de disparité montrent une variation approximativement linéaire pour les disparités croisées en fonction de l'excentricité de départ d'équation :  $Gradient = 0,0088 \times Exc + 0,527$  (régression :  $R^2 = 0,11$  ;  $p = 0,025$ <sup>18</sup>). Pour les disparités homonymes, l'approximation par une fonction linéaire de la variation des seuils en gradient de disparité en fonction de l'excentricité de départ est également possible, son équation est :  $Gradient = 0,021 \times Exc + 0,348$  (régression :  $R^2 = 0,33$  ;  $p < 0,001$ <sup>18</sup>). Les deux droites de régression sont significatives mais présentent des variances relativement peu élevées, indiquant que selon le cas environ 70 à 90 % des résultats ne sont pas expliqués par cette régression. Ces droites de régression n'expliquent donc pas plus de la moitié des résultats. Néanmoins, nous allons conserver ces approximations pour l'évaluation des gradients de disparités introduits par les verres ophtalmiques. Pour l'analyse des cartes de disparité horizontale introduite par les verres ophtalmiques, à partir de ces équations, on définit ainsi un rapport entre le gradient de disparité et l'excentricité qui indique un seuil de tolérance pour tout point du champ visuel. Ce rapport est différent selon si les disparités horizontales sont croisées ou homonymes :

$$\text{Pour les disparités croisées : } \frac{Gradient - 0,53}{Exc} = 0,0088$$

$$\text{Pour les disparités homonymes : } \frac{Gradient - 0,35}{Exc} = 0,021$$

Ainsi nous pouvons calculer ces différents rapports, selon si les disparités sont croisées ou homonymes, et, si le rapport obtenu pour une excentricité donnée est supérieur à celui correspondant ci-dessus, les disparités horizontales introduites pourront donc être considérées comme perceptibles par l'observateur.

Par ailleurs, les seuils de déformation juste perceptible ont ensuite été mesurés avec la méthode de stimuli constants pour un gradient de disparité placé entre 7 et 14° d'excentricité. Nous avons vu dans le paragraphe III du présent chapitre que ces déformations juste perceptibles présentent des seuils en gradient de disparité horizontale très faibles par rapport aux seuils de tolérance présentés ci-dessus. Cette méthode a permis d'obtenir des courbes psychométriques du pourcentage de réponse « concave » en fonction de la valeur du gradient de disparité. Le Tableau 6 indique les différents paramètres des courbes psychophysiques de

---

<sup>18</sup> Régression linéaire simple sur les résultats moyens obtenus avec le sparse RDS pour toutes les excentricités de départ.

chacun des observateurs permettant de calculer une estimation des seuils de discrimination d'une déformation concave ou convexe, en disparité croisée ou homonyme respectivement.

	Observateur	y(max)	b	Biais	y (%)	Gradient (arcsec/°)	Gradient moyen (arcmin/°)	Erreur-type
Seuil concave	BD		2.61	3.72		6.6		
	GG	100.00	7.33	-2.31	75	5.74	0.101	0.005
	MB		4.68	0.63		5.77		
Seuil convexe	BD		2.61	3.72		0.85		
	GG	100.00	7.33	-2.31	25	-10.36	-0.078	0.054
	MB		4.68	0.63		-4.5		

**Tableau 6 - Paramètres définissant les courbes psychométriques obtenues pour chaque observateur (pourcentage maximal y, b et le biais x0) et permettant d'estimer les seuils de discrimination (à 25 et 75% de réponse), pour chaque sens de déformation (respectivement convexe / concave).** Les gradients sont obtenus en secondes d'arc par seconde avec l'équation de la courbe de chaque observateur, ils sont en minutes d'arc par seconde pour les valeurs moyennes. Les gradients positifs correspondent à des disparités croisées et les gradients négatifs à des disparités homonymes.

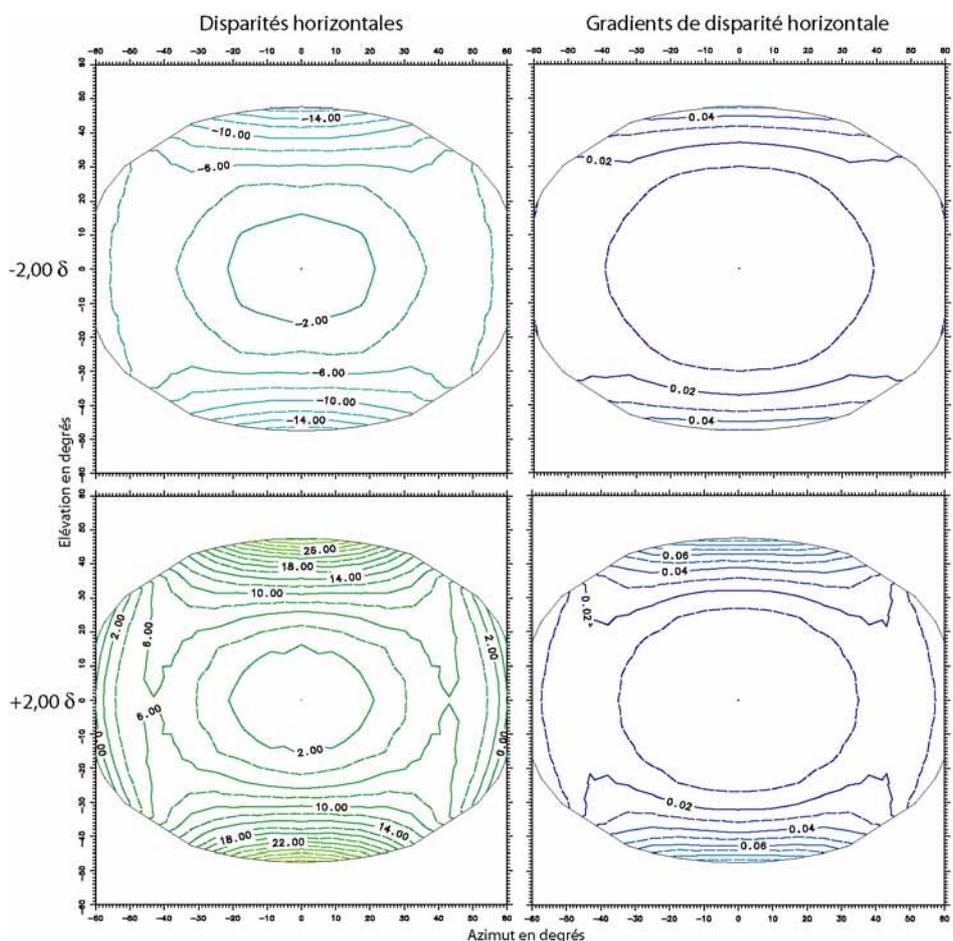
Notons que pour le seuil moyen convexe (correspondant théoriquement aux disparités homonymes), l'erreur-type est dix fois plus importante que pour le seuil moyen concave (correspondant aux disparités croisées), indiquant de grandes variations entre les observateurs. Ce seuil convexe peut d'ailleurs être obtenu pour des disparités croisées (BD). Pour l'analyse des disparités des verres ophtalmiques, nous considérerons la valeur moyenne calculée. Pour analyser les disparités horizontales introduites dans le champ visuel par rapport à ces seuils juste perceptibles, nous comparerons la valeur maximale de gradient de disparité horizontale introduite entre les excentricités 7 et 14°.

## V.2 Présentation de l'analyse

Les verres ophtalmiques introduisent des disparités binoculaires dans tout le champ visuel binoculaire. Le Chapitre 2 les a décrits simplement dans leur décomposition en disparité horizontale et disparité verticale, dans le champ visuel. A présent, au regard des résultats expérimentaux, la composante horizontale peut être analysée plus en détail afin de mettre en évidence son possible impact sur la perception stéréoscopique. Les résultats des expériences ne sont pas précisément transposables aux verres ophtalmiques, les disparités horizontales introduites par les verres sont continues mais non monotones du centre vers la périphérie. Néanmoins ces résultats peuvent permettre une première analyse relativement pertinente.

Les mesures de seuils de la disparité horizontale ont montré l'importance des gradients de disparité dans la détection. Les données de disparité horizontale des verres ophtalmiques doivent donc fournir les valeurs de gradient de la disparité horizontale. La Figure 56 représente les exemples de cartes d'iso-gradient de disparité horizontale (cartes à droite) que l'on obtient pour des couples de verres de -2,00 dioptries (en haut) et de +2,00 dioptries (en bas). Les gradients de disparité horizontale sont calculés pour chaque point de la grille initiale

par rapport aux points voisins, à partir des différences de valeurs de la disparité horizontale des points voisins divisées par l'angle de séparation de ces points (cf. Annexe 3).



**Figure 56 - Cartes d'iso-disparité (à gauche) et d'iso-gradient de disparité horizontale (à droite) pour des couples de verres unifocaux de -2,00 dioptries (en haut) et de +2,00 dioptries (en bas). Les disparités horizontales sont en minutes d'arc et les gradients de disparité horizontale en minutes d'arc par degré.**

Les valeurs de gradient intéressantes pour cette analyse sont : (i) les valeurs de gradient de disparité horizontale maximales dans une ellipse de  $90^\circ$  horizontal sur  $70^\circ$  vertical, correspondant aux dimensions du stimulus présenté dans les expériences ; (ii) les rapports du gradient de disparité horizontale sur l'excentricité supérieurs à celui des seuils ; (iii) la valeur maximale de gradient de disparité horizontale dans une couronne définie par des cercles d'excentricité  $7^\circ$  et  $14^\circ$ , correspondant à la zone de variation pour laquelle nous avons des seuils juste perceptibles. Notons que la distance de fixation des expériences étant de 650 mm, la grille, utilisée pour calculer les distorsions puis les disparités, est également considérée à 650 mm des deux yeux pour permettre la comparaison.

Les données pertinentes pour l'analyse des disparités binoculaires des verres ophtalmiques sont donc les gradients de disparité horizontale avec le signe des disparités horizontales (positif – croisées ; négatif – homonymes), d'une part par le rapport des gradients en fonction de l'excentricité et d'autre part le gradient maximal entre les excentricités 7 et  $14^\circ$ .

### V.3 Comparaison des disparités horizontales calculées avec les seuils mesurés

Le Tableau 7 regroupe les caractéristiques pertinentes des couples de verres ophtalmiques étudiés dans le Chapitre 2.

Type de correction	Puissance		Disparités horizontales			
	OD	OG	Signe	Valeur maximale gradient (70°x90°) (arcmin/°)	Coefficient Gradient/ exc	Valeur maximale gradient (7-14°) (arcmin/°)
Isométrie sphérique	-2,00	-2,00	homonymes	0.013	< Seuil	0.00054
	+2,00	+2,00	croisées	0.021	< Seuil	0.00029
	+4,00	+4,00	croisées	0.046	< Seuil	0.0006
Astigmatisme	-2,00(+1,00)90°	-2,00(+1,00)90°	homonymes	0.0078	< Seuil	0.00031
	-2,00(+1,00)0°	-2,00(+1,00)0°	homonymes	0.0078	< Seuil	0.0001
	-2,00(+1,00)45°	-2,00(+1,00)135°	sup : croisées inf : homonymes	0.092	< Seuil	0.0033
Galbe	+2,00	+2,00	homonymes	0.39	> seuil à partir de 50° d'exc	0.0022
Anisométrie	+2,00	+4,00	gauche : homonymes droit : croisées	0.583	> seuil à partir de 50° d'exc	0.012

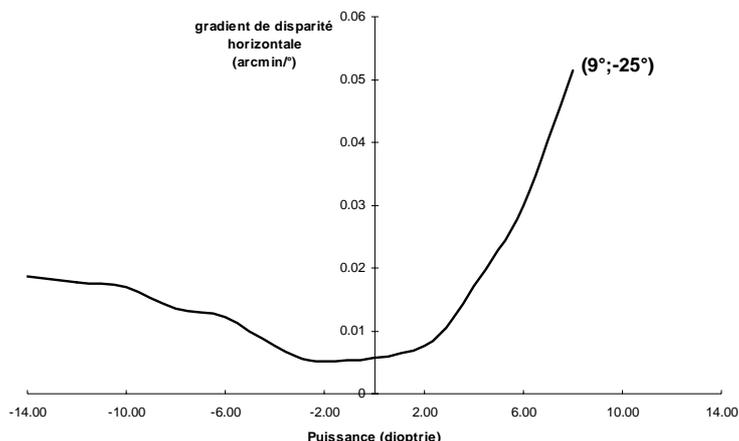
**Tableau 7 - Résumé des valeurs de disparités horizontales calculées pour plusieurs couples de verres :** leur signe (croisées ou homonymes), les valeurs maximales du gradient sur l'ensemble de l'ellipse de 70° par 90°, et dans l'anneau compris entre 7 et 14° d'excentricité, et le rapport du gradient sur l'excentricité, s'il est inférieur ou supérieur à celui du seuil.

Les différents couples sont classés en plusieurs types de correction, correspondant à l'amétropie (isométrie myopique ou hypermétropique, astigmatisme ou anisométrie) ou à la particularité du montage des verres (le galbe). Les puissances de chacun des verres sont également mentionnées. Les caractéristiques des disparités horizontales, leur signe (croisées ou homonymes), les valeurs maximales de gradient sur le champ elliptique de 70 × 90° et sur le champ annulaire compris entre 7 et 14° d'excentricité.

Une première remarque peut être faite sur les valeurs de gradient de disparité horizontale : pour les exemples de couples de verres unifocaux que nous avons étudiés ci-dessus, le disque central de rayon 7° autour du point de fixation des deux yeux présente un gradient moyen de disparité horizontale très faible (proche de zéro). De même, sur la région annulaire comprise entre les excentricités 7 et 14°, la valeur maximale de gradient de disparité horizontale est faible, inférieure à 0,015 minute d'arc par degré, ce qui est très inférieur aux seuils de tolérance et aux seuils juste discriminables que nous avons mesurés.

Pour des puissances comprises entre -2,00 et +2,00 dioptries, les disparités horizontales sont faibles et le rapport du gradient en fonction de l'excentricité est toujours inférieur au seuil. A partir d'une puissance positive de +8,00 dioptries sur les deux yeux, le

rapport de gradient de disparité horizontale sur excentricité commence à dépasser les seuils mesurés au-delà d'une excentricité de 45°. Pour les verres de puissances négatives, comme le montre la progression du gradient de disparité horizontale de la Figure 57, même avec une puissance de -14 dioptries sur les deux yeux, le gradient de disparité horizontale ne dépasse ni les seuils de tolérance sur tout le champ, ni les seuils juste discriminables, entre 7° et 14° d'excentricité.



**Figure 57 - Courbe du gradient de disparité en fonction de la puissance du couple de verres isométriques.**  
Données pour le point de coordonnées (9°;-25°).

Pour les *couples isométriques sphériques*, les valeurs des gradients de disparité horizontale augmentent avec l'augmentation de la puissance des verres, particulièrement pour les verres positifs. Les déformations produites par les disparités horizontales seules de ces couples de verres sphériques de même puissance, inférieure à +8,00 dioptries, ne seraient donc pas perçues. Par contre, pour de fortes puissances positives, les porteurs de lunettes peuvent percevoir par les disparités horizontales des déformations périphériques concaves de l'espace, dues aux disparités horizontales croisées périphériques.

Les *verres cylindriques*, pour les *porteurs astigmatés considérés*, présentent, comme les verres sphériques unifocaux, des gradients de disparité horizontale inférieurs aux seuils de tolérance et aux seuils juste discriminables. Rappelons, que dans le cas particulier d'astigmatisme dit oblique (à cause des axes de 45 et 135° de la correction cylindrique), la particularité des disparités horizontales est qu'elles sont croisées dans le champ visuel supérieur, et homonymes dans le champ visuel inférieur. Si les valeurs sont plus élevées, pour des astigmatismes plus importants, et atteignent les seuils de tolérance, les disparités horizontales seules pourront produire approximativement une perception d'inclinaison, pour une surface plane en réalité fronto-parallèle, avec le haut vers l'avant et le bas vers l'arrière d'un plan vertical. Les corrections des astigmatismes directs ou inverses (axes du cylindre négatif à 0° ou 90°<sup>19</sup>), identiques pour les deux yeux, introduisent des disparités horizontales

<sup>19</sup> Un exemple d'astigmatisme direct : -1,00(-1,00)0°, ce qui équivaut à -2,00(+1,00)90° ; et un exemple d'astigmatisme inverse : -1,00(-1,00)90°, ce qui est équivalent à -2,00(+1,00)0°.

de répartition relativement semblable aux verres sphériques, avec des valeurs maximales correspondant à la valeur maximale obtenue pour le verre de sphère moyenne<sup>20</sup>.

Pour le couple de verres de puissance +2,00 dioptries dont le *galbe des verres* est de 15°, la valeur maximale sur le champ elliptique de 0,39 minute d'arc par degré est inférieure aux seuils de tolérances mesurés pour les excentricités de départ de 7 et 14°. Elle est proche des seuils de tolérance obtenus quand les gradients de disparité horizontale commençaient au point de fixation, pour les disparités homonymes, ce qui est le cas également. De plus, le rapport du gradient en fonction de l'excentricité est supérieur au seuil pour des excentricités supérieures à 50°. Par contre, le gradient maximal entre 7 et 14° est inférieur au seuil convexe juste discriminable, mais, ce dernier dépend fortement de l'observateur. Les disparités horizontales pour ces verres galbés pourraient donc entraîner une perception déformée concave d'un plan.

Enfin pour le cas des *anisométries*, pour la différence de 2,00 dioptries entre le verre droit et le verre gauche, la valeur maximale de gradient de disparité horizontale, dans la zone centrale elliptique de 70 × 90°, vaut 0,58 minute d'arc par degré. Cette valeur maximale se trouve dans l'ordre de grandeur des seuils de tolérance mesurés expérimentalement, et le rapport gradient/excentricité est supérieur au seuil à partir de 50° d'excentricité. Néanmoins, la valeur maximale de gradient, dans une zone annulaire comprise entre 7 et 14°, est de 0,012 minute d'arc par degré. Pour cette zone annulaire, comparable aux mesures expérimentales, les seuils juste discriminables sont supérieurs à cette valeur maximale. D'autre part, les disparités horizontales présentent la particularité d'être homonymes dans le champ visuel gauche et croisées dans le champ visuel droit. Aussi les disparités horizontales seules peuvent-elles modifier la perception de la profondeur et déformer un plan vertical en l'orientant selon un axe vertical de telle sorte que la gauche soit vers l'arrière et la droite vers l'avant (correspondant approximativement à l'effet géométrique, décrit dans le Chapitre 1).

A propos des disparités horizontales, notons que pour les verres sphériques isométriques et non galbés, elles sont homonymes pour les verres négatifs et dans ce cas leurs valeurs maximales sont plus faibles que les valeurs maximales des verres positifs. L'ensemble des expériences a montré que, en champ visuel périphérique, la sensibilité aux disparités homonymes est plus grande que la sensibilité aux disparités croisées. Il est donc intéressant d'observer que, à puissance égale, les disparités sont plus faibles quand elles sont homonymes (cas des seuils les plus faibles) que quand elles sont croisées (cas des seuils les plus élevés).

Les disparités horizontales sont donc inférieures, en termes de gradient, aux seuils de tolérance et juste discriminables pour les cas généraux, c'est-à-dire de corrections semblables

---

<sup>20</sup> La sphère moyenne correspond à la puissance moyenne entre les deux axes. Pour les deux exemples ci-dessus, la sphère moyenne vaut -1,50 dioptries.

entre les deux yeux et inférieures à +8,00 dioptries, et de galbe nul. Par contre, dans les cas particuliers d'anisométrie ou de montage des verres avec un galbe, les gradients deviennent importants.

## **VI Conclusion générale sur les disparités horizontales**

La méthode d'ajustement ascendant que nous avons utilisée est appropriée à notre étude en grand champ et à l'application aux verres ophtalmiques. D'une part, la méthode de stimuli constants donne des valeurs de seuils très faibles, avoisinant les limites de résolution de l'affichage nécessaire pour une présentation de grande taille de champ visuel. D'autre part, la sensibilité aux disparités binoculaires qui nous intéresse pour l'étude des verres ophtalmiques s'apparente plus à des seuils de tolérance aux disparités qu'à des seuils de détection purs. De plus, la vitesse d'affichage choisie, de 3 images/s, est préférable à une vitesse supérieure. Cette méthode d'ajustement ascendant est plus proche de conditions naturelles.

Dans la perception de déformation du plan fronto-parallèle par des disparités horizontales de variation continue, le système stéréoscopique humain semble traiter les disparités horizontales de façon globale : il traiterait les gradients de disparité horizontale plutôt que les différences de disparité, en fonction de la localisation de leur point de départ. Les disparités horizontales seraient donc analysées de façon *dérivée* (le gradient au niveau d'un point de l'image est la dérivée de la disparité en ce point, cf. Chapitre 1). De plus, la sensibilité aux disparités horizontales dépend de leur signe, elle est plus faible pour les disparités croisées et plus forte pour les disparités homonymes.

Les disparités horizontales sont traitées avec un plan de référence qui n'est pas nécessairement le plan de fixation (Glennerster *et al.*, 2002). Dans notre cas, ce pourrait être la plus grande zone disparate ou la grande périphérie qui présente les disparités les plus importantes. En effet, avec l'introduction progressive des disparités, les observateurs percevaient plus la zone centrale, sans disparité ajoutée, se déplacer que la périphérie disparate. Les disparités horizontales ne donnent pas une information précise sur la convergence des yeux et le plan de fixation puisqu'elles perturbent la perception au point d'avoir l'impression que le point de fixation se déplace en profondeur. Pour cela, les disparités horizontales jugeraient de la profondeur relative, plutôt que de la profondeur absolue.

Des post-effets de relief peuvent être observés suite à l'introduction de disparités horizontales de variation continue dans le champ visuel. Ce phénomène se manifeste par une perception de déformation d'une surface plane, sans disparité, la déformation étant de courbure opposée à celle produite immédiatement avant par les disparités horizontales introduites. Cet effet consécutif de relief est intéressant à mentionner, puisqu'il peut se

produire avec des verres ophtalmiques : les disparités binoculaires introduites dans le champ visuel du porteur de verres ophtalmiques peuvent ne plus être perçues avec l'adaptation, mais lors du retrait de ses lunettes le porteur peut avoir l'impression qu'une surface plane, telle qu'un mur, est déformée, alors qu'elle ne lui semblait plus l'être avec ses lunettes. Notons que dans notre présente analyse des éventuels post-effets, nous avons évoqué la possibilité d'effets consécutifs à des disparités infraliminaires. La mesure des seuils par la méthode de stimuli constants a permis de mettre en évidence des seuils de sensibilité aux déformations très faibles par rapport à la méthode d'ajustement ascendant. Aussi, les post-effets étudiés avec la méthode d'ajustement n'étaient jamais réellement infraliminaires, ce qui explique pourquoi ils pouvaient influencer les seuils. Une expérience avec des post-effets infraliminaires, au sens des mesures en stimuli constants, serait intéressante mais difficile à mettre en place compte tenu de la limitation au niveau de la résolution de l'écran de grand champ. Notre étude des post-effets a été réalisée à partir de mesures obtenues dans un tout autre but, le protocole initial n'était pas construit pour cette étude. Néanmoins, les différents points soulevés dans la présente analyse, et particulièrement la relation entre l'importance du post-effet et le seuil mesuré, incluant les effets consécutifs à des disparités horizontales que l'on qualifie d'infraliminaires, seraient des aspects pertinents à étudier sur les effets consécutifs de relief. Pour ce faire, il serait nécessaire de mettre en place une nouvelle expérience où les conditions de mise en évidence des post-effets seraient contrôlées.



## **Chapitre 5. Combinaison des disparités horizontales et verticales**

Dans ce chapitre, nous n'envisagerons plus les disparités horizontales seules, mais dans leurs interactions avec les disparités verticales. Dans les scènes visuelles naturelles, les disparités horizontales sont rarement seules, elles sont généralement associées à des disparités verticales, c'est pourquoi ces deux composantes peuvent être étudiées conjointement. Le but de la combinaison, dans notre étude, est de préciser le rôle des disparités verticales dans la détection de déformations périphériques de surface plane induites par les disparités horizontales. Les deux hypothèses initiales sont que (1) les disparités verticales seraient utilisées dans la perception des formes tridimensionnelles et (2) elles serviraient à évaluer la distance de fixation. Pour tester ces hypothèses, deux expériences sont réalisées introduisant des disparités verticales calculées à partir de la forme tridimensionnelle obtenue par les gradients de disparité horizontale (cf. Chapitre 4). La première partie du présent chapitre présentera l'expérience où les disparités verticales ont été ajoutées soit de façon congruente, soit en conflit par rapport aux disparités horizontales. La seconde partie analysera l'addition de disparités verticales calculées pour une forme placée dans d'autres plans de profondeur que celui des disparités horizontales. Les résultats montrent que les disparités verticales peuvent modifier la sensibilité aux gradients de disparité horizontale. Ces modifications vont dépendre des signes des disparités horizontales et verticales par rapport au plan de l'écran. Nous terminerons par l'application des résultats de la combinaison des disparités horizontales et verticales aux verres ophtalmiques.

### ***1 Introduction sur la manipulation des disparités verticales***

Le Chapitre 2 nous a montré la présence de disparités verticales introduites dans le champ visuel par des verres ophtalmiques. La répartition de ces disparités induites indique qu'elles sont surtout présentes en périphérie du champ visuel et qu'elles sont très faibles, voire nulles, au centre (Figure 58). D'autre part, leurs signes, différents dans chaque quadrant autour du point de fixation, peuvent être congruents ou créer un conflit avec la profondeur induite par les disparités horizontales.

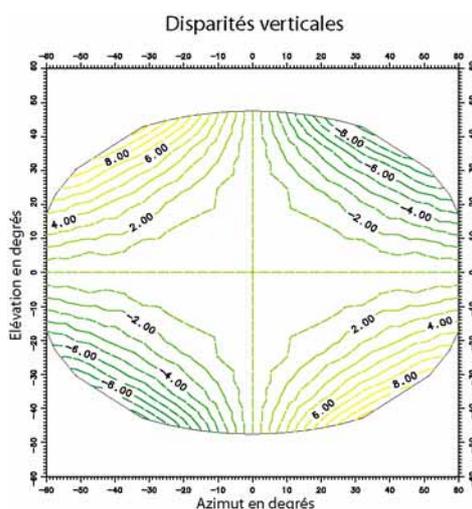


Figure 58 - Cartes d'iso-disparités verticales (en minutes d'arc) correspondant à un couple de verres de +2,00 dioptries pour un plan de fixation situé à 650 mm.

Les disparités verticales donneraient des informations sur la distance absolue d'une surface quand elles sont présentes sur l'ensemble du champ visuel (Gillam et Lawergren, 1983 ; Rogers et Bradshaw, 1993 ; Duke et Howard, 2005). L'information sur l'excentricité d'un objet reste une question controversée, selon les auteurs (Banks *et al.*, 2002). Quand la disparité verticale se trouve à proximité du point de fixation, elle indique plutôt une orientation de regard de côté par rapport à la surface, c'est le cas de l'effet induit (Gillam *et al.*, 1988a) Les modifications de la disparité verticale en vision centrale (sur une zone de moins de 10 degrés, autour du point de fixation) n'ont pas d'effet sur la perception des formes tridimensionnelles (Cumming *et al.*, 1991). Par contre, la manipulation des disparités verticales sur une large étendue visuelle modifie le rapport de taille verticale créant une perspective différentielle. Le système visuel humain exploite le fait que les effets de la perspective différentielle augmentent avec l'excentricité et donc regroupe l'information sur une large étendue visuelle pour obtenir une estimation de la distance absolue qui est utilisée pour mesurer les disparités (Rogers et Bradshaw, 1993). Enfin, les disparités verticales seraient utilisées dans d'autres plans que le plan de fixation (Duke et Howard, 2005).

Par ailleurs, Berends et Erkelens (2001) ont observé que certains sujets étaient plus sensibles à la disparité verticale que d'autres. Ces auteurs montrent que le ratio entre disparité horizontale et verticale qui évoque la perception d'un stimulus fronto-parallèle varie avec le type de disparité verticale (gradient vertical, cisaillement ou forme quadratique mixte). Il existe un conflit entre la disparité verticale et les signaux oculomoteurs.

Finalement, les disparités horizontales et verticales semblent pouvoir s'ajouter ou s'annuler localement selon leur signe (Matthews *et al.*, 2003). L'impression de relief par la disparité verticale seule n'est pas évidente, cependant elle peut être quantifiée. De plus, le système visuel ne tolère pas si facilement une petite quantité de disparité verticale (Ito, 2005).

Les disparités verticales sont mesurées localement par le système visuel et elles s'ajoutent aux disparités horizontales.

Pour comprendre le rôle des disparités verticales dans la perception de déformations de surface induites par des disparités horizontales, nous allons conserver la distribution en gradient de la disparité horizontale. Des seuils de détection d'une déformation en profondeur d'un plan fronto-parallèle seront également mesurés sur la base des disparités horizontales. Nous allons ajouter des disparités verticales calculées sur les formes tridimensionnelles (concavité ou convexité) produites par les disparités horizontales réparties en gradient concentrique, dans le but de tester les deux hypothèses suivantes : (1) les disparités verticales seraient utilisées dans la perception des formes tridimensionnelles et (2) elles serviraient à évaluer la distance de fixation. Une première expérience a été réalisée avec des disparités verticales ajoutées soit de façon congruente, soit en conflit par rapport aux disparités horizontales, en termes de forme tridimensionnelle (Devisme *et al.*, 2006a). Une seconde expérience introduit des disparités verticales calculées pour une forme placée dans d'autres plans de profondeur que celui des disparités horizontales (Devisme *et al.*, 2007b). Pour ces deux expériences, le pattern des disparités verticales est semblable à l'exemple de la Figure 59.

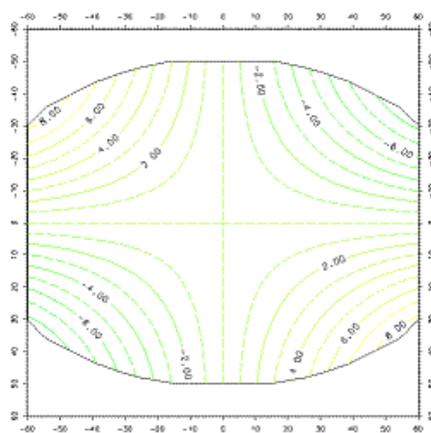


Figure 59 - Carte type d'iso-disparités verticales (en minutes d'arc) appliquées aux stimuli des deux expériences.

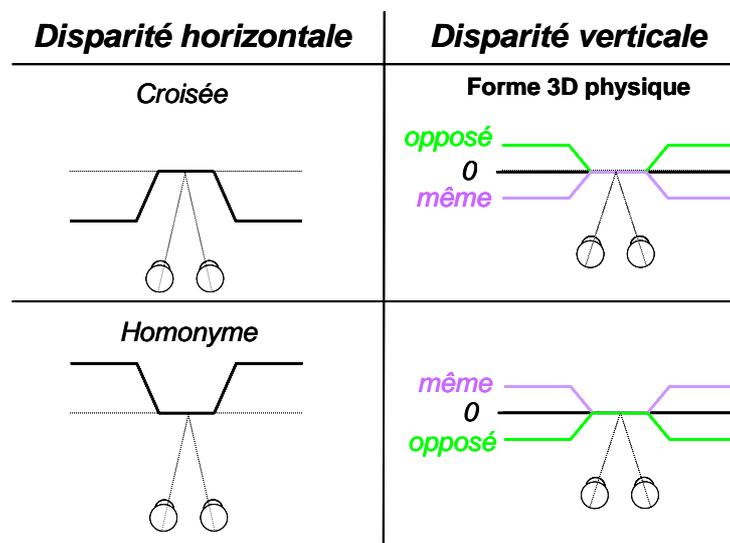
## **II Première expérience : disparités verticales en conflit ou congruente**

### **II.1 Matériel et Méthode**

La variation de la disparité horizontale introduite se fait de manière concentrique, avec un premier cercle d'excentricité  $7^\circ$  et un second cercle d'excentricité  $14^\circ$  (cf. Chapitre 3 - Méthodologie générale). La valeur de la disparité introduite dans la couronne périphérique

est constante et égale à la valeur aux points d'excentricité 14°. Dans tous les cas, cette variation de disparité horizontale se trouvera entre 7 et 14° d'excentricité, et sera modifiée de la même manière pour toutes les conditions : la progression du gradient de disparité horizontale se fait avec une vitesse de 0,0324 à 0,0414 minute d'arc par degré par seconde. La distribution des disparités horizontales crée une perception de déformation concave ou convexe d'une surface plane : les disparités plus importantes en périphérie produisent une perception de la périphérie en avant ou en arrière du plan de fixation, en fonction de leur signe, respectivement croisé ou homonyme.

Les disparités verticales vont être calculées à partir de la forme physique obtenue avec la distribution des disparités horizontales, décrite ci-dessus. La forme physique utilisée pour le calcul des disparités verticales est placée de telle sorte que son centre (le point central du stimulus) se trouve dans le plan de l'écran. Les disparités verticales peuvent être calculées sur la même forme physique que les disparités horizontales, ou sur la forme physique opposée par rapport aux disparités horizontales. Les formes physiques opposées entre les deux composantes de disparité signifient que si les disparités horizontales créent une forme concave, par exemple avec des disparités croisées, les disparités verticales sont calculées pour une forme convexe dont le centre est dans le plan de l'écran et la périphérie en arrière. Les différentes possibilités sont représentées schématiquement sur la Figure 60.



**Figure 60 - Représentation schématique (vue de dessus) des différentes conditions de calcul des disparités verticales :** dans la colonne de gauche, la coupe dans le plan horizontal passant par les deux yeux de la forme physique obtenue par les disparités horizontales ; dans la colonne de droite, les coupes de la forme physique correspondante utilisée pour le calcul des disparités verticales.

Les calculs de la disparité verticale sont réalisés point par point, en envisageant la distance en profondeur par rapport à l'observateur de chaque point de la forme physique souhaitée. Le détail des calculs de la valeur de la disparité verticale d'un point en fonction de sa distance par rapport à l'observateur se trouve en Annexe 14.

Pour cette expérience, la méthode d'ajustement ascendant avec choix forcé a été conservée. Pour les disparités horizontales très faibles observées avec une méthode de stimuli constants, les disparités verticales sont encore plus faibles. Aussi la résolution angulaire de l'écran limite-t-elle l'affichage des disparités verticales en stimuli constants. Avec la méthode d'ajustement, le contrôle de la fixation est nécessaire et est réalisé par électro-oculographie (EOG). Il est demandé au sujet de fixer la cible de fixation pendant toute la durée de l'expérience. Il est rappelé au sujet que les électrodes de l'électro-oculographe sont là pour contrôler la fixation (phraséologie : cf. Annexe 6).

Une précédente expérience (Chapitre 4) nous a permis de mettre en évidence l'influence d'un possible post-effet de relief avec ce type de protocole. Le post-effet, quand il est perçu, est difficile à supprimer complètement, il faut présenter une image pendant au minimum 10 secondes avant de commencer chaque nouvelle mesure, sans la certitude de son absence. D'autre part, l'influence de cet effet consécutif sur nos valeurs de seuils dépend de son sens par rapport à celui de la mesure. Sur la totalité des seuils moyennés, son influence s'annule, sa présence ne modifiant pas les résultats globaux. Nous avons donc décidé de ne pas chercher à le supprimer. De plus, pour cette expérience le diamètre de la déformation est identique d'une série à l'autre, ainsi a pu être analysée l'influence du post-effet sur les seuils dans des conditions semblables. Après l'image de préfixation, chaque mesure de seuil commence uniquement par une image sans disparité ajoutée (stimulus dans le plan de l'écran) pendant 2 secondes, suivie des images disparates. Le déroulement de l'expérience est semblable aux expériences sur la disparité horizontale, il est rappelé par le schéma de la Figure 37.

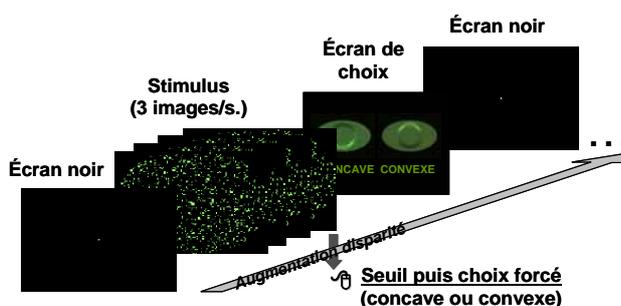


Figure 61 - déroulement de l'expérience.

Les caractéristiques des différentes conditions de disparité verticale sont reportées dans le Tableau 8. Les différentes conditions sont dupliquées selon le signe des disparités horizontales, croisées ou homonymes. La condition n°1 est une condition contrôle, elle ne présente que des disparités horizontales, respectivement croisées ou homonymes. Pour les autres conditions, on ajoute la disparité verticale calculée à partir de la forme physique obtenue avec les gradients de disparité horizontale (Figure 60) : (a) le sens de la forme, concave ou convexe est le même entre les formes des disparités horizontales et celles des

disparités verticales (condition 2) ; (b) le sens de la forme est opposé, les formes concaves de disparité horizontale sont combinées avec des formes convexes de disparité verticale, et inversement (condition 3).

condition	type de modification disparité verticale	sens forme disparité verticale / forme disparité horizontale
1	contrôle	0
2	forme	même
3		opposé

**Tableau 8 - Paramètres définissant la disparité verticale, son type de modification, le sens de la forme utilisée pour son calcul par rapport à la forme obtenue par disparités horizontales et la position du plan de fixation utilisée pour son calcul par rapport au plan de l'écran, pour chaque série testée.**

Nous avons donc trois conditions ou trois séries selon le signe de la disparité horizontale, soit 10 mesures de seuils au total (disparités croisées et homonymes). Trois mesures de seuils par série ont été réalisées au cours d'une session. La durée de l'expérience devait donc être de 20 à 30 minutes. Les séries étaient présentées dans un ordre aléatoire. Trois sessions ont été gardées pour chaque observateur, soit un total de neuf mesures de seuils pour chaque couple d'excentricité, et par observateur. Sur l'ensemble des mesures et des observateurs, sept valeurs de seuil n'ont pas été retenues pour l'analyse, à cause de réponses erronées.

Nous avons sélectionné cinq observateurs sans correction, satisfaisant aux critères d'inclusion définis dans le Chapitre 3 (Méthodologie générale). Trois observateurs (BD, CP et GG) étaient habitués aux expériences psychophysiques, les deux autres (ND et MB) n'étaient pas habitués aux expériences psychophysiques. Les caractéristiques des cinq observateurs (sexe, âge, écarts pupillaires, correction optique portée et stéréoaocuité) se trouvent dans le Chapitre 3.

## **II.2 Résultats**

L'analyse statistique des seuils de détection d'une déformation de surface plane obtenus en faisant varier les disparités verticales a été réalisée par un test d'analyse de variance ANOVA sur des mesures répétées. La disparité horizontale (croisée ou homonyme) est considérée comme un facteur intra. De même, la disparité verticale constitue un facteur intra, elle comporte trois classes : (1) disparité nulle (contrôle avec uniquement les disparités horizontales) ; (2) disparité calculée à partir de la forme obtenue avec les disparités horizontales ; (3) disparité calculée à partir de la forme opposée (en terme de profondeur) à celle obtenue avec les disparités horizontales.

## II.2.1 Résultats globaux

Les premières observations générales portent sur les variations des seuils au cours des répétitions des mesures, les différences de seuils entre les observateurs et enfin les différences de seuils en termes de signe de la disparité horizontale. Ces premières observations viennent confirmer les résultats des études précédentes.

### II.2.1.1 Variabilité intra-individuelle

L'analyse de l'évolution des mesures au cours des répétitions ne montre pas de différence significative (ANOVA répétitions :  $F_{8, 32} = 1,20$  ;  $p = 0,33^{21}$ ) sur l'ensemble des seuils et des observateurs. Si l'on regarde plus en détail la variation des seuils au cours des répétitions, observateur par observateur, sachant que chaque séance comportait trois mesures de seuil par série, on obtient les résultats suivant : Pour un bloc de trois mesures qui se sont suivies (c'est-à-dire au cours d'une séance, on dira une session), globalement on observe une différence significative (ANOVA répétitions :  $F_{2, 8} = 6,71$  ;  $p = 0,019^{22}$ ).

L'analyse plus précise montre peu de différences significatives entre ces trois mesures : pour les deux premières sessions, on observe des seuils plus faibles pour la troisième et dernière répétition (tests post-hoc :  $p < 0,02^{23}$ ). Par contre, pour la dernière session, les trois mesures de seuil ne sont pas significativement différentes (tests post-hoc :  $p > 0,8^{23}$ ), on peut dire que ces trois mesures sont stables. Il y a donc un léger effet d'apprentissage au sein des deux premières sessions, qui n'est pas retrouvé pour la dernière session. Néanmoins, entre les trois sessions, on n'observe pas de différence significative entre les seuils moyens (ANOVA session :  $F_{2, 8} = 0,26$  ;  $p = 0,77^{22}$ ). On peut donc considérer que l'effet de l'apprentissage est faible.

### II.2.1.2 Variabilité interindividuelle

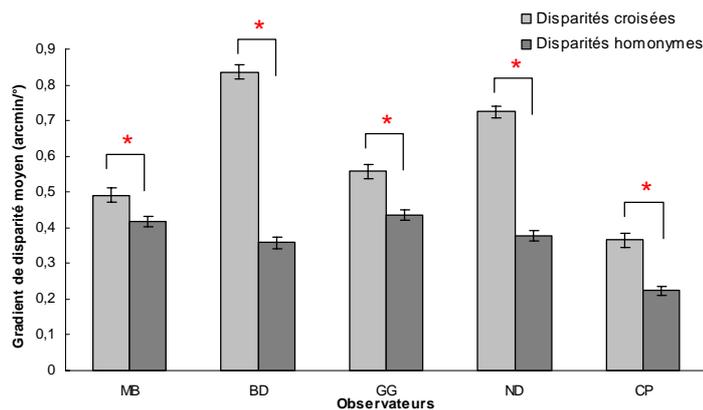
Les observateurs montrent des seuils globalement différents les uns par rapport aux autres : CP présente toujours les seuils les plus faibles, comparativement aux quatre autres observateurs. Les seuils moyens les plus élevés sont ceux de BD, mais surtout pour les disparités horizontales croisées. La Figure 62 représente les seuils de chaque observateur en fonction du signe de la disparité horizontale (croisée et homonyme). Pour les disparités homonymes, les seuils moyens des observateurs BD, GG, MB et ND sont relativement proches. Dans le cas des disparités croisées, les seuils sont plus dispersés.

---

<sup>21</sup> ANOVA : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; facteurs intra : répétitions (9), type de disparité horizontale (2) et type de disparité verticale (3).

<sup>22</sup> ANOVA : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; facteurs intra : sessions (3), répétitions (3), type de disparité horizontale (2) et type de disparité verticale (3).

<sup>23</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effets : sessions (3) \* répétitions (3).



**Figure 62 - Représentation des gradients de disparité horizontale moyens au seuil de détection d’une déformation de surface plane pour chaque observateur selon le type de disparité horizontale (croisée ou homonyme).** Les barres d’erreur représentent  $\pm 1$  erreur-type et les astérisques indiquent une différence significative ( $p < 0,05$ ).

Le test de sphéricité sur l’ensemble des mesures de chaque observateur donne un résultat significatif ( $p = 0,0049^{24}$ ) qui indique la variabilité de chaque mesure (même disparité horizontale, même disparité verticale, même mesure) entre les 5 observateurs. Ce test souligne la présence de différences de seuils entre les observateurs, comme nous l’avons observé sur la Figure 62.

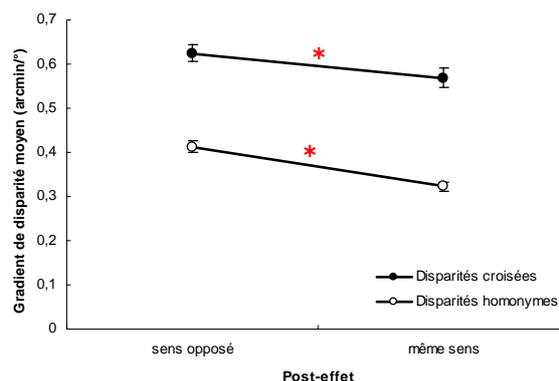
### II.2.1.3 L’effet consécutif de relief

L’analyse du post-effet prédit montre une influence de celui-ci sur les seuils, confirmant les conclusions de l’expérience précédente à ce sujet. La différence entre les seuils consécutifs à un post-effet opposé et les seuils consécutifs à un post-effet de même sens est significative sur l’ensemble des résultats (ANOVA<sub>sens du post-effet</sub> :  $F_{1,293} = 40,93$  ;  $p < 0,001^{25}$ ) de même quel que soit le signe de la disparité horizontale (ANOVA<sub>sens du post-effet\*signe de la disparité horizontale</sub> :  $F_{1,293} = 2,84$  ;  $p = 0,093^{25}$  et disparités croisées ou disparités homonymes :  $p < 0,01^{26}$ ), comme le montre la Figure 63. On observe ainsi des seuils plus faibles quand le post-effet prédit était de même sens et des seuils plus élevés quand celui-ci était de sens opposé.

<sup>24</sup> Test de sphéricité de Mauchley : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effets : disparité horizontale \* disparité verticale \* répétitions.

<sup>25</sup> ANOVA : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue uniquement en présence de post-effet ; variables catégorielles : observateurs, signe de la disparité horizontale, série et sens du post-effet (opposé ou même).

<sup>26</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue uniquement en présence de post-effet ; effets : post-effet \* type de disparité.



**Figure 63 - Variation des seuils de détection de déformation en fonction du post-effet et selon le signe de la disparité horizontale.** Le post-effet est soit dans le sens opposé à la série présentée, soit dans le même sens que la série présentée. L'astérisque rouge au-dessus d'une ligne indique une différence significative au seuil de 0,05 entre les deux valeurs reliées par cette ligne. Les disparités croisées sont schématisées par les ronds pleins, et les disparités homonymes par les ronds vides. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type.

Pour les observateurs communs aux deux expériences (disparités horizontales et combinaison), les tendances sont assez semblables à celles observées précédemment : CP ne montre pas d'influence du post-effet sur ses valeurs de seuils, GG présente des seuils significativement différents selon le sens du post-effet par rapport à la mesure, les seuils de BD ne sont pas toujours influencés. Concernant l'observateur MB, dans la présente expérience, il montre une modification des seuils en fonction du post-effet pour les disparités homonymes, alors qu'il s'agissait des disparités croisées dans les expériences précédentes. Cet observateur, qui a pourtant signalé sa perception de post-effet, n'est pas toujours influencé par leur présence lors de la mesure consécutive. De même, MB qui ne semblait pas sensible aux post-effets dans la précédente expérience, l'est dans cette expérience. Pour ces deux observateurs (BD et MB), le post-effet n'influence pas dans tous les cas les mesures de seuils, alors que les deux autres observateurs (GG et CP) semblent avoir toujours le même comportement en présence de post-effets.

L'influence du post-effet est donc globalement retrouvée dans ce cas où les disparités sont réparties de façon semblable entre les différentes mesures. Cependant, tous les observateurs ne montrent pas le même comportement par rapport au post-effet. Quand les disparités horizontales et verticales sont en conflit, il est possible que le post-effet de relief soit modifié. La même analyse réalisée uniquement pour des disparités horizontales et verticales congruentes (pour la mesure réalisée, sans tenir compte de la congruence ou du conflit au niveau de la mesure précédente entraînant le post-effet) semble donner les mêmes résultats. Rappelons que le but initial de cette expérience n'était pas de mettre en évidence l'influence du post-effet. L'introduction de disparités horizontales et verticales en conflit pouvait influencer différemment les seuils, mais cette condition était présentée aléatoirement au milieu des autres. Il est donc difficile d'analyser les résultats en mettant de côté cette condition, le nombre de valeurs analysable s'en retrouve réduit puisque cette condition de

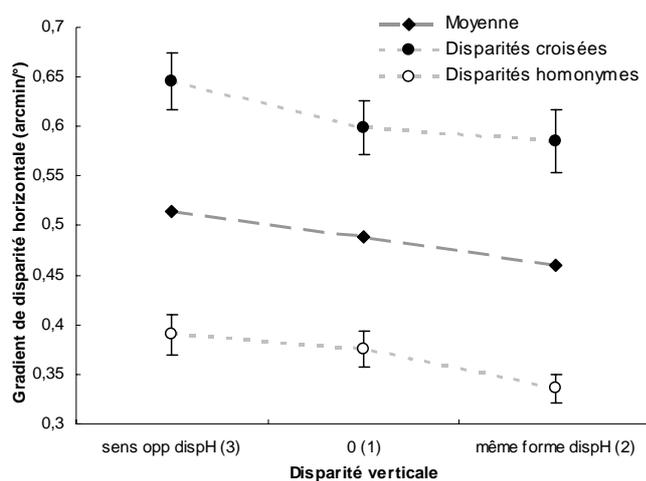
conflit peut engendrer un post-effet différent mais elle peut également être influencée différemment selon le post-effet. En conclusion par rapport aux conditions de cette expérience, l'effet consécutif semble donc influencer les mesures de seuils de discrimination de déformations en profondeur, en particulier si les localisations rétinienne du post-effet et de la mesure sont identiques.

### II.2.1.4 La disparité horizontale

Comme le montre la Figure 62, les disparités croisées présentent des seuils de détection significativement plus élevés que les disparités homonymes (ANOVA  $\text{disparité horizontale}$  :  $F_{1,4} = 9,11$  ;  $p = 0,039^{21}$ ). Néanmoins, d'après la Figure 62, cette différence de seuils entre les deux signes de disparité horizontale n'est pas identique pour tous les observateurs : elle est importante pour BD et ND, mais l'est moins pour MB, GG et CP. Cette différence est également retrouvée pour chacune des conditions de disparité verticale (tests post-hoc :  $p < 0,001^{27}$ ).

### II.2.1.5 La disparité verticale

La comparaison des trois conditions étudiées (les deux conditions avec disparités verticales et la classe sans disparité verticale) met en évidence des différences significatives (ANOVA  $\text{disparité verticale}$  :  $F_{4,16} = 4,50$  ;  $p = 0,012^{21}$ ). De plus, comme le montre la Figure 64, les seuils en gradient de disparité horizontale suivent les mêmes variations en fonction de la disparité verticale appliquée, pour les disparités croisées et pour les disparités homonymes (ANOVA  $\text{disparité horizontale} * \text{disparité verticale}$  :  $F_{4,16} = 0,27$  ;  $p = 0,89^{21}$ ).



**Figure 64 - Représentation des seuils de détection en gradient de disparité horizontale (minutes d'arc par degré), pour les disparités croisées et homonymes et la courbe moyenne, en fonction de la disparité verticale appliquée : 0 est la condition contrôlée (1) sans disparité verticale ; ensuite les disparités verticales correspondant à la forme 3D de la disparité horizontale (2), ou la forme opposée (3). Les barres d'erreur représentent  $\pm$  l'erreur-type.**

<sup>27</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effets : disparité horizontale (signe) \* disparité verticale (condition).

L'analyse avec les disparités horizontales et verticales met en évidence des différences significatives entre les deux cas où la disparité verticale est calculée sur la forme de la disparité horizontale, quand les disparités sont congruentes (2) ou son inverse, quand les disparités sont en conflit (3) (test post-hoc :  $p = 0,012^{28}$ ). Les seuils sont plus élevés quand le sens de la forme physique est opposé entre les disparités verticales et les disparités horizontales et plus faibles quand les formes physiques des disparités horizontales et verticales correspondent. La condition sans disparité verticale présente des seuils intermédiaires entre les seuils de la condition de conflit (sens opposé) et ceux de la condition congruente (même sens) entre les composantes horizontales et verticales de la disparité. Ces seuils intermédiaires sont significativement supérieurs à ceux de la condition congruente (2) (test post-hoc :  $p = 0,033^{28}$ ), mais ils ne sont pas significativement différents de la condition de conflit (3) (test post-hoc :  $p = 0,35^{28}$ ). Ces résultats globaux vont à présent être analysés plus en détail pour mettre en évidence l'influence des disparités verticales sur les disparités horizontales selon si elles sont en conflit ou congruentes.

### **II.2.2 Analyse détaillée des disparités verticales congruentes ou en conflit de forme 3D avec les disparités horizontales**

Les deux conditions pour lesquelles les disparités verticales ont été calculées à partir de la forme 3D obtenue avec la disparité horizontale (forme concave ou convexe) sont définies comme suit : si les disparités horizontales et verticales correspondent précisément à la même forme physique, elles sont congruentes ; si les disparités verticales sont calculées sur la forme opposée à celle produite par la disparité horizontale, les disparités sont dites en conflit. L'analyse sur l'ensemble des observateurs révèle une différence significative entre les deux conditions contenant des disparités verticales, de signes opposés (2 et 3) ( $p = 0,0013^{28}$ ), différence que l'on retrouve quel que soit le signe de la disparité horizontale, croisée ou homonyme (tests post-hoc :  $p < 0,025^{29}$ ). Ainsi, les seuils sont supérieurs quand les disparités sont en conflit aux seuils obtenus quand elles sont congruentes. Par contre, les seuils des disparités horizontales seules, quel que soit le signe de la disparité horizontale, ne sont pas significativement différents des deux autres conditions (tests post-hoc :  $p > 0,056^{29}$ ). Par rapport aux seuils avec uniquement des disparités horizontales, croisées ou homonymes, les seuils ont tendance à augmenter si les disparités verticales introduites sont en conflit et ont tendance à diminuer si les disparités verticales sont congruentes.

Les comparaisons individuelles pour chacun des cinq observateurs mettent uniquement en évidence, chez un observateur (BD), une augmentation des seuils entre les disparités verticales calculées sur la forme obtenue en disparité horizontale (2) et celles

---

<sup>28</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effet : disparité verticale.

<sup>29</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effets : disparité verticale \* disparité horizontale.

calculées sur la forme opposée (3) (test-t de Student :  $p = 0,005^{30}$ ). Ce résultat n'est finalement retrouvé que pour les disparités croisées (test-t de Student :  $p = 0,02^{31}$ ). De même pour l'observateur MB, en considérant les disparités horizontales quel que soit leur signe, le test de Student indique une différence entre les valeurs moyennes des classes (2) et (3) ( $p = 0,015^{30}$ ). Ces résultats ne sont pas retrouvés si on étudie séparément les disparités horizontales croisées et homonymes. Les résultats obtenus pour chaque observateur en gradient de disparité horizontale en fonction de la disparité verticale ajoutée se trouvent en Annexe 16.

Le point qui semble ressortir de cette analyse est l'augmentation des seuils en gradient de disparités horizontales quand les disparités verticales sont ajoutées de façon congruente et ceux quand il y a conflit entre les deux types de disparités (Figure 64) : si les disparités horizontales et verticales sont congruentes pour la même forme physique tridimensionnelle, alors la sensibilité à la déformation du plan est plus grande ; et si les deux composantes de la disparité sont en conflit (calculées sur des formes opposées concave / convexe), alors la sensibilité est plus faible. Par contre, ces modifications de la sensibilité semblent faibles par rapport à la déformation obtenue uniquement par les disparités horizontales : on observe une diminution presque continue entre les seuils des disparités en conflit et les seuils des disparités congruentes, passant par les seuils des disparités horizontales, mais ces diminutions intermédiaires ne sont pas toujours significatives. Les seuils des disparités horizontales tendent donc à augmenter avec des disparités verticales en conflit et à diminuer avec des disparités verticales congruentes.

### **II.3 Discussion**

Il est important de signaler qu'un observateur (CP) semble particulièrement sensible aux disparités verticales, confirmant l'observation de Berends et Erkelens (2001) de différence de sensibilité entre les individus : CP a déclaré avoir des difficultés de jugement sur la forme concave ou convexe à cause d'une différence de concavité / convexité entre la zone centrale et une zone plus périphérique quand les disparités sont en conflit. Les formes qu'il percevait ressemblaient à des « chapeaux mexicains », avec plus spécifiquement des déformations à partir de la moyenne périphérie jusqu'à la grande périphérie perçues vers l'avant ou vers l'arrière. Cette difficulté de jugement lui compliquait la tâche de détection. On constate en effet que CP présente un pourcentage d'erreur de 7,8 %, contre

---

<sup>30</sup> Test t de Student pour échantillon apparié, observateur BD : variables comparées : classes (2) et (3) de disparité verticale.

<sup>31</sup> Test t de Student pour échantillon apparié, observateur BD, disparités croisées : variables comparées : classes (2) et (3) de disparité verticale.

moins de 1 % pour les quatre autres observateurs. Cependant, ses résultats en fonction de la disparité verticale varient de manière semblable à l'ensemble des observateurs.

Des différentes analyses réalisées, le seul résultat significatif est la modification des seuils de détection d'une déformation de surface plane entre les deux conditions où des disparités verticales sont introduites. En d'autres termes, l'augmentation des seuils observée est significative uniquement entre le cas des disparités verticales calculées sur la forme physique théorique obtenue par les disparités horizontales (2) et le cas des disparités verticales calculées sur l'inverse de la forme physique théorique obtenue par les disparités horizontales (3). Les seuils sont plus faibles quand les disparités verticales et horizontales sont complémentaires ou congruentes, et sont plus élevés quand les disparités verticales sont en conflit avec les disparités horizontales. Par contre, les seuils obtenus avec des disparités horizontales seules semblent supérieurs aux seuils des disparités horizontales et verticales congruentes et inférieurs à ceux des disparités en conflit. Pourtant ces différences ne sont pas significatives. En conclusion, l'introduction de disparités verticales, calculées pour la même forme ou la forme opposée, ne modifie pas significativement les seuils obtenus pour les disparités horizontales. Mais le sens des disparités verticales introduites, ou leur signe, influence les seuils : si le signe des disparités horizontales périphériques (croisées ou en avant du plan de fixation / homonymes ou en arrière du plan de fixation) est congruent avec le signe des disparités verticales périphériques (respectivement en avant / en arrière du plan de fixation), des déformations de surface seront perçues plus facilement que si les disparités horizontales et verticales sont de signes opposés ou en conflit. Les disparités verticales périphériques de sens de relief inverse aux disparités horizontales par rapport au plan de fixation rendent la perception de déformation plus difficile, elles compliquent la détection.

La détection d'une déformation de surface est donc relativement bonne avec des disparités horizontales, elle semble être améliorée par application des disparités verticales définissant la même forme tridimensionnelle que les disparités horizontales. D'autre part, pour diminuer la sensibilité à des déformations de surface, on pourra appliquer des disparités verticales correspondant à la forme tridimensionnelle symétrique par rapport au plan de fixation à celle correspondant aux disparités horizontales.

### III Seconde expérience : disparités verticales dans un autre plan de profondeur

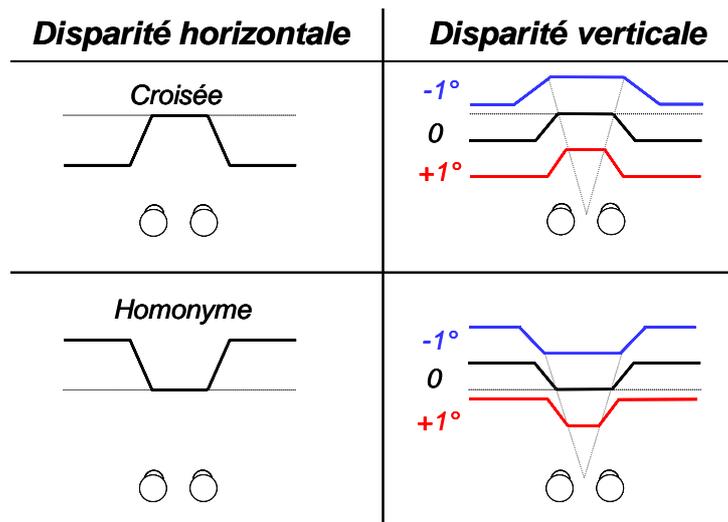
#### III.1 Matériel et méthode

Pour toutes les séries, les variations continues de la disparité horizontale sont toujours appliquées entre les excentricités de 7 et 14°. Les caractéristiques des trois conditions de disparité verticale sont reportées dans le Tableau 9.

condition	type de modification disparité verticale	sens forme disparité verticale / forme disparité horizontale	Déplacement forme dispV (en variation de convergence)
1	contrôle	même	0
2	distance	même	+ 1°
3		même	- 1°

**Tableau 9 - Paramètres définissant la disparité verticale, son type de modification, le sens et le déplacement de la forme utilisée pour son calcul par rapport à la forme obtenue par disparités horizontales, pour chaque série testée.**

La condition 1 est une condition contrôle, elle présente les disparités horizontales, croisées ou homonymes, et les disparités verticales calculées pour la même forme physique. Cette condition est équivalente à la condition 2 de l'expérience précédente. Pour les autres conditions, on modifie la disparité verticale, calculée à partir de la forme physique obtenue avec les gradients de disparité horizontale, en jouant sur la distance de cette forme physique. La distance de position de la forme peut être dans le plan de fixation (condition contrôle), c'est-à-dire au même endroit que la forme théorique des disparités horizontales, en avant ou en arrière du plan de fixation. Les différentes possibilités de combinaison des disparités horizontales (croisées et homonymes) avec les disparités verticales, obtenues à partir de ces conditions, sont représentées dans la Figure 65. Le déplacement de la forme physique utilisée pour le calcul des disparités verticales est noté en variation de convergence du nouveau plan de cette forme correspondant à la modification de la distance. La diminution de la distance est une augmentation de 1 degré de l'angle de convergence (condition 2 / +1°), et l'augmentation de la distance est une diminution de 1 degré de l'angle de convergence (condition 3 / -1°).



**Figure 65 - Représentation schématique (vue de dessus) des différentes conditions de calcul des disparités verticales :** dans la colonne de gauche, la coupe dans le plan horizontal passant par les deux yeux de la forme physique obtenue par les disparités horizontales ; dans la colonne de droite, les coupes de la forme physique correspondante utilisée pour le calcul des disparités verticales.

La forme physique utilisée pour les disparités verticales est la même que celle des disparités horizontales, elle est simplement déplacée par homothétie en avant ou en arrière de l'écran. En effet, les valeurs angulaires sont conservées entre les différentes formes physiques utilisées pour le calcul des disparités horizontales et des disparités verticales. La Figure 65 illustre schématiquement les modifications apportées à la forme physique utilisée pour le calcul des disparités verticales par rapport à la forme originelle théorique que produit le gradient concentrique de disparité horizontale. Le déplacement de la forme en avant ou en arrière du plan de l'écran est calculé sur une variation de la convergence sur ce plan déplacé : une augmentation de l'angle de convergence indique un plan en avant de l'écran ou une diminution de la distance de présentation ; une diminution, un plan en arrière de l'écran ou une augmentation de la distance de présentation. Une modification de la convergence sur un plan de  $+1^\circ$  produit un décalage d'environ 97 mm en avant du plan de l'écran (à 650 mm) ; et une modification de  $-1^\circ$  produit un décalage d'environ 138 mm en arrière. Le calcul des disparités verticales, à partir des distances de chaque point d'une forme définie par des disparités horizontales, se trouve en Annexe 15.

Nous avons donc trois conditions ou trois séries selon le signe de la disparité horizontale, soit six mesures de seuils au total (disparités croisées et homonymes). Neuf répétitions de chaque mesure de seuil par série ont été réalisées au total. La durée de l'expérience devait être de moins de 30 minutes. Les différentes séries étaient présentées dans un ordre aléatoire. Trois sessions ont été gardées pour chaque observateur, soit un total de neuf mesures de seuils pour chaque couple d'excentricité, et par observateur. Les observateurs sont les mêmes que pour l'expérience précédente (cf. § II.1)

## III.2 Résultats

L'analyse statistique des seuils de détection d'une déformation de surface plane obtenus en faisant varier les disparités verticales a été réalisée par un test d'ANOVA sur des mesures répétées. La disparité horizontale (croisée ou homonyme) est considérée comme un facteur intra (ou « mesures répétées »). La disparité verticale constitue également un facteur intra, elle comporte trois classes : (1) disparité verticale dans le plan de l'écran (mesure contrôle, avec les disparités horizontales et verticales congruentes calculées pour une déformation partant du plan de l'écran) ; (2) disparité verticale dite en avant du plan de l'écran, c'est-à-dire calculée pour la forme obtenue avec les disparités horizontales, mais déplacée en avant de l'écran (augmentation de la demande de convergence de 1° pour ce plan) ; (3) disparité verticale dite en avant du plan de l'écran, c'est-à-dire calculée pour la forme obtenue avec les disparités horizontales, mais déplacée en avant de l'écran (diminution de la demande de convergence de 1° pour ce plan).

### III.2.1 Résultats globaux

Les premières observations générales portent sur les variations des seuils au cours des répétitions des mesures, les différences de seuils entre les observateurs et enfin les différences de seuils en fonction du signe de la disparité horizontale.

#### III.2.1.1 Variabilité intra-individuelle

Pour chaque condition de disparité verticale, testée selon le signe de la disparité horizontale, la mesure a été répétée plusieurs fois de la façon suivante : par session de 3 mesures répétées (mélangées aléatoirement entre les différentes conditions), et 3 sessions de 3 mesures ont été réalisées successivement entrecoupées d'une pause. Ainsi l'analyse par l'ANOVA des mesures répétées a été divisée en deux facteurs intra : session et répétition. Cette analyse ne fait pas ressortir de différence statistiquement significative entre les 3 répétitions au sein des sessions (ANOVA répétitions :  $F_{2,2} = 12,41$  ;  $p = 0,075^{32}$ ), ni entre les 3 sessions (ANOVA sessions :  $F_{2,2} = 6,23$  ;  $p = 0,14^{32}$ ). En étudiant plus précisément les 9 répétitions (toutes sessions confondues), il semblerait que seules les cinquièmes et sixièmes répétitions (ou deuxième et troisième de la deuxième session) soient significativement différentes des autres répétitions (test post-hoc :  $p < 0,02^{33}$ ) : elles montrent des valeurs supérieures, mais non significatives, à toutes les autres répétitions. En conclusion, on n'observe pas de différences entre les différentes mesures répétées, il n'y a donc eu d'effet ni d'apprentissage, ni de fatigue.

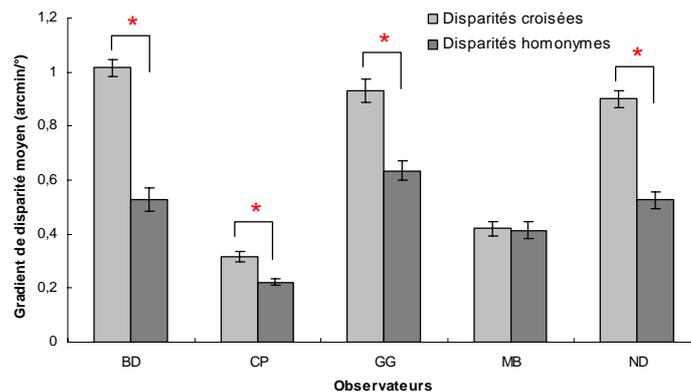
---

<sup>32</sup> ANOVA : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; facteurs intra : répétitions (3), sessions (3), signe de la disparité horizontale (2), plan de la disparité verticale (3).

<sup>33</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effets : sessions \* répétitions.

### III.2.1.2 Variabilité interindividuelle

On observe une variabilité des seuils entre les cinq observateurs. On retrouve les mêmes tendances que pour les précédentes expériences : MB et CP ont des seuils faibles, inférieurs aux trois autres observateurs et en particulier CP a toujours les seuils les plus faibles. BD, GG et ND ont des seuils assez semblables. La Figure 66 représente les seuils de perception de la déformation pour chacun des observateurs selon le signe de la disparité horizontale appliquée (croisée ou homonyme). Les différences interindividuelles entre les observateurs MB/CP et les observateurs BD/GG/ND sont plus marquées pour les disparités croisées que pour les disparités homonymes. Pour les disparités homonymes les seuils sont répartis régulièrement entre les plus faibles pour CP et les plus élevés pour GG. Le test de sphéricité sur l'ensemble des mesures de chaque observateur donne un résultat significatif ( $p = 0,049^{34}$ ) qui indique la variabilité de chaque mesure (même disparité horizontale, même disparité verticale, même session et même répétition) entre les 5 observateurs.



**Figure 66** - Représentation des gradients de disparité horizontale moyens au seuil de détection d'une déformation de surface plane pour chaque observateur selon le type de disparité horizontale (croisée ou homonyme). Les barres d'erreur représentent  $\pm$  l'erreur-type et les astérisques rouges une différence significative ( $p < 0,05$ ).

La Figure 66, met en évidence des différences de seuils entre les observateurs, comme le confirme le test de sphéricité.

*Remarque* : Nous noterons qu'un observateur (CP) a fait beaucoup d'erreurs dans les réponses données au choix forcé (20 % d'erreurs sur l'ensemble des mesures), comparativement aux autres observateurs (entre 0 et 5 % d'erreurs). Ces erreurs se trouvent être en grande majorité réparties sur les mesures où les disparités horizontales croisées étaient associées aux disparités verticales calculées pour un plan en arrière du plan de l'écran. Dans ce cas, seules trois des mesures répétées (une pour chaque session) ont été acceptées. Cette

<sup>34</sup> Test de sphéricité de Mauchly : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effets : disparité horizontale \* disparité verticale \* sessions \* répétitions.

observation semble confirmer la sensibilité de cet observateur pour les disparités verticales que nous avons mentionnée pour l'expérience précédente (§ II.3).

### III.2.1.3 La disparité horizontale

Jusqu'à présent, l'étude des gradients de disparités horizontales appliqués de façon concentrique avait mis en évidence de manière hautement significative des seuils différents selon le signe de la disparité. En effet, on obtenait toujours des seuils, en valeur absolue, supérieurs pour les disparités croisées par rapport aux disparités homonymes. D'après la Figure 66, à l'exception de MB, les seuils semblent montrer cette même tendance. Pourtant, l'analyse statistique globale ne montre pas de différence statistiquement significative entre les seuils des disparités croisées et ceux des disparités homonymes (ANOVA *disparité horizontale* :  $F_{1,1} = 56,44$  ;  $p = 0,084^{32}$ ). Pour l'analyse, il est possible de remplacer les valeurs manquantes (qui dans notre cas sont relativement importantes pour CP) par une valeur moyenne correspondant pour chaque cas aux valeurs rigoureusement répétées pour un même observateur. Dans ce cas, on observe une différence relativement significative entre les disparités croisées et les disparités homonymes (ANOVA *disparité horizontale* :  $F_{1,4} = 7,78$  ;  $p = 0,049^{35}$ ). La Figure 67 de la partie suivante permet en partie d'expliquer ces résultats ne mettant pas en évidence la différence de seuils entre les disparités croisées et les disparités homonymes, que nous avons observée dans les expériences précédentes. En effet, les modifications de seuils induites par les différents patterns de disparité verticale sont telles que dans le cas des disparités verticales calculées pour un plan en avant, les seuils entre les disparités horizontales croisées et homonymes ne sont pas significativement différents (test post-hoc :  $p = 0,079^{36}$ ). Par contre, dans le cas des disparités verticales dans le plan de l'écran ou en arrière, les seuils sont significativement différents entre les disparités croisées et homonymes (tests post-hoc : respectivement  $p = 0,03$  et  $p = 0,01^{36}$ ).

### III.2.2 La disparité verticale selon son plan de profondeur

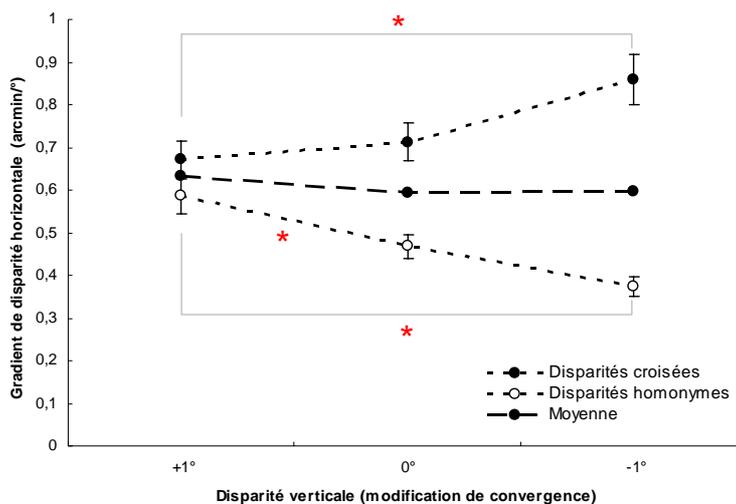
Sur l'ensemble des résultats, on n'observe pas de différence de seuil de disparité horizontale en fonction de la disparité verticale ajoutée (ANOVA *disparité verticale* :  $F_{2,2} = 4,06$  ;  $p = 0,198^{32}$  ou  $F_{2,8} = 3,87$  ;  $p = 0,067^{35}$ ). Mais il est plus intéressant d'étudier l'influence des disparités verticales selon le signe des disparités horizontales (croisées ou homonymes), comme nous avons commencé à le souligner dans la partie précédente. En effet, comme le montre la Figure 67, la courbe représentant les seuils moyens quel que soit le signe de la disparité horizontale varie peu en fonction des disparités verticales appliquées. On note néanmoins une différence entre la disparité verticale en avant ( $+1^\circ$ ) et les disparités verticales

---

<sup>35</sup> ANOVA : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue, *sans valeurs manquantes* ; facteurs intra : répétitions (3), sessions (3), signe de la disparité horizontale (2), plan de la disparité verticale (3).

<sup>36</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effets : disparité verticale \* disparité horizontale.

dans de plan de l'écran (0°) et en arrière (-1°) (tests post-hoc :  $p < 0,047^{37}$ ). Par contre, entre les disparités horizontales croisées et homonymes, on observe une interaction significative des gradients de disparité horizontale au seuil (ANOVA  $\text{disparité horizontale} * \text{disparité verticale}$  :  $F_{2,8} = 12,24$  ;  $p = 0,0037^{35}$ ). Entre les trois conditions, des disparités verticales dans un plan en avant aux disparités verticales dans un plan en arrière en passant par les disparités verticales du même plan que les disparités horizontales, pour les disparités homonymes on observe une augmentation des seuils, quand il s'agit d'une diminution pour les seuils des disparités croisées.



**Figure 67 - Représentation des seuils de détection en gradient de disparité horizontale (en minutes d'arc par degré), pour les disparités croisées et homonymes et la courbe moyenne, en fonction de la disparité verticale appliquée :** la disparité verticale est notée en termes de variation du plan de convergence dans lequel ces disparités verticales ont été calculées, le signe positif signifie une augmentation de convergence donc un plan en avant de l'écran et réciproquement pour le signe négatif. Les barres d'erreur représentent  $\pm$  l'erreur-type.

Sur la Figure 67, les disparités verticales en abscisse sont classées selon le plan dans lequel elles sont calculées, c'est-à-dire de gauche à droite, d'un plan en avant du plan de l'écran (+1°), à un plan en arrière (-1°) en passant par le plan de l'écran au centre (0°). Ainsi, on peut observer que les seuils en disparités horizontales ont tendance à augmenter avec l'éloignement du plan des disparités verticales pour les disparités croisées, et à diminuer pour les disparités homonymes. En effet, pour les disparités croisées, les seuils augmentent significativement entre les disparités verticales en avant (+1°) et les disparités verticales en arrière (-1°) du plan de l'écran ( $p = 0,039^{36}$ ). De même pour les disparités homonymes, les seuils des disparités verticales en avant (+1°) du plan de l'écran sont significativement supérieurs à ceux dans le plan (0°) de l'écran ( $p = 0,028^{36}$ ) et en arrière (-1°) ( $p = 0,002^{36}$ ). L'étude des variations de seuils en fonction de la disparité verticale pour chacun des observateurs est détaillée en Annexe 17.

<sup>37</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue sans valeurs manquantes ; effets : disparité verticale.

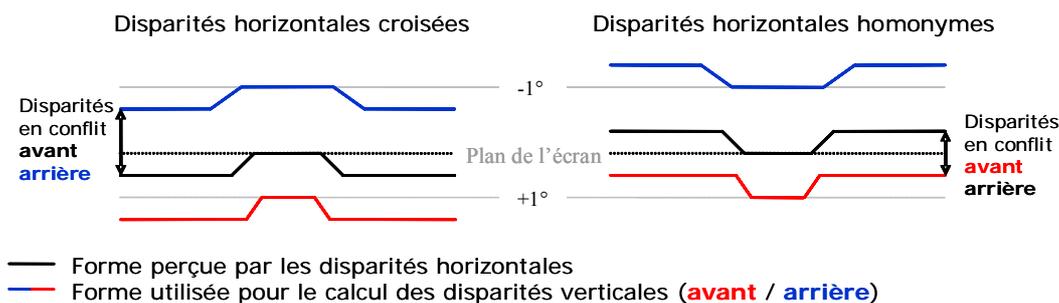
Bien que les résultats ne soient pas toujours significatifs, on peut ressortir de cette analyse détaillée par observateur les tendances suivantes : (i) pour les disparités horizontales croisées, les seuils semblent augmenter entre les disparités verticales en avant et les disparités verticales en arrière ; (ii) pour les disparités horizontales homonymes, les seuils semblent diminuer entre les disparités verticales en avant et les disparités verticales dans le plan de l'écran ou en arrière.

### **III.3 Discussion**

Dans cette seconde expérience, les disparités verticales sont toujours congruentes, en termes de forme, avec les disparités horizontales, au regard de la première expérience avec des disparités verticales (cf. § II). Il s'agit donc toujours de la forme tridimensionnelle théorique obtenue avec les disparités horizontales à partir de laquelle on calcule les disparités verticales. Mais cette fois, la forme servant à calculer les disparités verticales est placée dans différents plans de profondeur : soit en avant du plan de fixation, en arrière ou dans le plan de fixation.

Les résultats semblent montrer une influence du plan des disparités verticales sur les seuils, en gradient de disparité horizontale, de perception d'une déformation de surface. L'influence du plan des disparités verticales dépend du signe de la forme considérée (concave ou convexe) : en effet, dans le cas d'une forme concave (la disparité horizontale est alors croisée), les seuils de détection de la déformation ont tendance à être plus faibles quand le plan des disparités verticales est en avant et plus élevés quand le plan des disparités verticales est en arrière. Par contre, pour une forme convexe (la disparité horizontale est alors homonyme), ce serait l'inverse, les seuils seraient plus importants avec des disparités verticales dans un plan en avant et plus faible pour des disparités verticales dans un plan en arrière. Ainsi on peut augmenter la sensibilité aux déformations de surface produites par des disparités périphériques en ajoutant des disparités verticales calculées pour un autre plan : un plan en avant de celui des disparités horizontales croisées ou un plan en arrière de celui des disparités horizontales homonymes. De même on peut diminuer cette sensibilité en appliquant des disparités verticales calculées dans un plan en arrière du plan des disparités horizontales croisées ou en avant du plan des disparités horizontales homonymes.

L'explication que l'on peut donner à ces résultats est représentée sur la Figure 68, représentant les différentes combinaisons testées entre les disparités horizontales et verticales.



**Figure 68 - Schéma représentant les différentes configurations testées :** à gauche dans le cas des disparités horizontales croisées et à droite dans le cas des disparités homonymes ; la forme rouge représente la forme perçue par les disparités horizontales et les formes noires la forme ayant servi à calculer les disparités verticales.

Les différences observées entre le comportement avec des disparités horizontales croisées et celui avec des disparités homonymes peuvent s'expliquer par le fait que si le plan des disparités verticales produit une profondeur dans un sens (par rapport au plan de fixation) qui se trouve être l'opposé du sens de la profondeur produit par les disparités horizontales, les disparités horizontales et verticales se trouvent en conflit. Ce conflit de sens de la profondeur au niveau du champ périphérique (lieu des disparités horizontales non nulles) va entraîner une augmentation des seuils de perception de la disparité horizontale par « compensation » des disparités horizontales par les disparités verticales. D'autre part, quand les plans de profondeur en périphérie sont dans le même sens (en avant avec des disparités croisées et en arrière avec des disparités homonymes), les disparités horizontales et verticales sont « congruentes » en termes de sens de profondeur, et ainsi les effets des deux types de disparités vont se cumuler. Ces disparités congruentes peuvent entraîner une diminution des seuils, en gradient de disparité horizontale, de perception de la déformation par détection plus rapide de la déformation.

Nous pouvons noter que les effets obtenus sont parfois plutôt des tendances, les modifications n'étant pas toujours significatives. Nous avons choisi des plans pour les disparités verticales relativement proches du plan de l'écran, de  $\pm 1^\circ$  en termes de variation de plan de convergence, soit environ 10 ou 14 mm respectivement en avant ou en arrière du plan de fixation, pour la zone centrale. Des essais avec des décalages plus importants ont été réalisés produisant des fortes disparités verticales en périphérie perceptibles dès la première image disparate, et également de plus fortes disparités à proximité du point de fixation qui sont difficilement fusionnées. Il nous était donc difficile de tester des décalages supérieurs.

D'autre part, quand les disparités horizontales et verticales sont relatives à des plans de profondeur différente, elles correspondent à une convergence différente. Les disparités horizontales étant dans tous les cas dans le plan de fixation, elles devraient indiquer une convergence congruente avec celle générée pour fixer le point de fixation. Pourtant, lors des expériences sur la disparité horizontale seule, certains observateurs percevaient le centre de la

déformation (zone sans disparité ajoutée) avec le point de fixation comme se déplaçant par rapport à la périphérie disparate (cf. Chapitre 4). Les disparités horizontales ne seraient donc pas un bon indice de la convergence des yeux. Avec l'application de disparités verticales indiquant d'autres plans de convergence des yeux, la convergence des yeux doit résoudre un conflit entre le plan de convergence que lui indique les disparités horizontales et celui des disparités verticales. Le système visuel essaie de régler ce conflit en s'appuyant essentiellement sur les disparités verticales pour évaluer un plan de convergence perceptif commun.

En conclusion, les disparités verticales peuvent améliorer la sensibilité aux déformations (concave ou convexe) de surface quand elles sont calculées pour produire une profondeur dans le même sens (par rapport au plan de fixation) que les disparités horizontales. Et inversement les disparités verticales peuvent détériorer la sensibilité aux déformations de surface quand elles sont calculées pour produire une profondeur de signe opposé à celle produite par les disparités horizontales, par rapport au plan de fixation.

## ***IV L'application aux verres optiques***

### **IV.1 Synthèse des résultats des deux expériences en vue de l'application aux verres optiques**

Les résultats des différentes expériences peuvent à présent être transposés pour analyser les combinaisons de disparités horizontales et verticales introduites par les verres optiques. Pour cela, une synthèse des principaux résultats est nécessaire, afin d'envisager l'étude des disparités binoculaires des verres unifocaux.

Les deux expériences combinant des disparités horizontales et des disparités verticales, étaient réalisées dans des conditions similaires où la variation continue de la disparité horizontale était concentrique et située dans un anneau entre les excentricités 7 et 14°. Les résultats montrent que l'introduction de disparités verticales peut modifier les seuils de tolérance aux déformations produites par des disparités horizontales : les disparités verticales diminuent les seuils si elles sont de même signe que la disparité horizontale et les augmentent quand elles sont de signe opposé. Le signe, dans ce cas, correspond au sens du relief (avant / arrière) par rapport au plan de fixation. Seul change le sens de la forme (concave / convexe) ou le plan de profondeur dans lequel se trouve la forme (en avant, en arrière ou dans le plan de l'écran). Les résultats moyens de ces deux expériences se trouvent résumés dans le Tableau 10.

Disparités horizontales	Sens forme disparité verticale	Seuils disparité horizontale		Disparité verticale valeur maximale (arcmin)	Plan de convergence disparité verticale	Seuils disparité horizontale		Disparité verticale valeur maximale (arcmin)
		Gradient moyen (arcmin/°)	Ecart-type			Gradient moyen (arcmin/°)	Ecart-type	
disparités croisées	même	0,585	0,206	0,41	+1° (avant)	0,673	0,291	6,74
	0	0,599	0,180	0,00	0°	0,713	0,299	0,57
	opposé	0,646	0,192	0,46	-1° (arrière)	0,859	0,361	5,54
disparités homonymes	même	0,336	0,095	0,26	+1° (avant)	0,586	0,261	5,38
	0	0,375	0,121	0,00	0°	0,467	0,176	0,37
	opposé	0,390	0,137	0,30	-1° (arrière)	0,374	0,149	5,00

**Tableau 10 - Synthèse des résultats des expériences de combinaison des disparités horizontales et verticales pour les deux directions de la disparité horizontale (croisée/homonyme), et selon le calcul des disparités verticales (le sens ou le plan de profondeur de la forme 3D utilisée).** Pour chaque combinaison, une estimation de la valeur maximale de la disparité verticale (en valeur absolue, sachant que chaque quadrant a un signe différent) est donnée à titre indicatif.

Les disparités verticales ont été calculées à partir de la forme obtenue avec les disparités horizontales. Ce calcul se fait à partir de la distance physique, par rapport à l'observateur, de chaque point obtenu par application de la disparité horizontale. La profondeur d'un point quelconque permet de calculer la disparité verticale. Les valeurs des disparités verticales au seuil sont donc proportionnelles à la valeur du gradient de disparité horizontale au seuil de discrimination et elles sont plus importantes pour des plans différents du plan de l'écran. Par exemple, pour le gradient de disparité croisée (0,713 minute d'arc par degré) obtenu avec les disparités verticales correspondantes et dans le même plan de profondeur, la valeur maximale de la disparité verticale dans le champ du stimulus est d'environ 0,6 minute d'arc (en valeur absolue, le signe étant opposé entre quadrants voisins mais pour une même excentricité la valeur absolue est semblable). Si la disparité verticale est calculée pour un plan en avant du plan des disparités horizontales (gradient de 0,673 minute d'arc par degré au seuil), la valeur maximale devient environ 6,7 minutes d'arc. De même quand les disparités verticales sont calculées pour un plan en arrière (gradient de disparité horizontale de 0,859 minute d'arc par degré au seuil), la valeur maximale est de 5,5 minutes d'arc, mais, dans ce cas de disparités croisées, les signes sont opposés par rapport au plan de l'écran ou en arrière. Pour les disparités horizontales homonymes, les valeurs sont légèrement inférieures dans chacun des cas, les valeurs de gradient de disparité horizontale aux seuils de détection étant généralement plus faibles que pour les disparités croisées.

L'analyse des disparités binoculaires introduites par les verres unifocaux pourra s'appuyer sur ces résultats. Nous considérerons les valeurs de gradient de disparité horizontale en fonction du signe relatif des disparités horizontales et verticales : le signe des disparités horizontales croisées est positif (en avant), et celui des disparités homonymes est négatif (en arrière) ; pour les disparités verticales, le signe représente le sens de la profondeur qu'elles produisent, en avant ou en arrière du plan de fixation. Nous pourrions utiliser les valeurs des seuils mesurés pour les disparités horizontales seules en fonction de l'excentricité comme référence, puisque ces valeurs ne sont pas significativement différentes de celles où les disparités verticales sont pour la même forme. Nous pourrions néanmoins dire que dans les cas

où les disparités verticales sont en conflit, les seuils sont en réalité plus élevés, mais cette référence reste acceptable. Pour l'analyse, nous regarderons donc les gradients de disparités horizontales, en fonction de l'excentricité (cf. Chapitre 4), que nous jugerons par rapport au signe des disparités verticales : si les disparités horizontales et verticales sont de même signe, la déformation produite par les disparités horizontales sera renforcée ; si les disparités horizontales et verticales sont de signe opposé, alors les disparités verticales pourront en partie compenser la déformation produite par les disparités horizontales. La forme tridimensionnelle, et dans le cas des verres ophtalmiques, la déformation de surface (concavité / convexité), est produite par les disparités horizontales. Les disparités verticales l'amplifient quand elles sont de même signe et la réduisent quand elles sont de signe opposé.

A partir des différentes données obtenues expérimentalement, les disparités binoculaires, horizontales et verticales, induites par les verres ophtalmiques peuvent être comparées avec ses différents seuils de tolérance ou seuils juste perceptibles, selon le cas. Pour cette comparaison des disparités introduites par un couple de verres ophtalmiques, quelques précisions sont nécessaires quant à la manière d'analyser les répartitions de disparités introduites :

- (a) Les disparités horizontales donnent un sens de relief identique sur tout le champ visuel quand elles sont de même signe. Les disparités croisées, par convention de signe positif, donnent un relief en avant du plan de fixation dans tout le champ visuel et inversement pour les disparités homonymes ;
- (b) Dans la perception de déformation de surface, le système visuel traite les gradients de disparité horizontale dans le champ visuel, plutôt que les disparités relatives ;
- (c) Les disparités verticales donnent un sens de relief différent selon leur signe et le quadrant du champ visuel considéré ;
- (d) Si le signe des disparités verticales est congruent, en termes de sens de profondeur par rapport au plan de fixation, avec le signe des disparités horizontales (en bleu sur la Figure 69), la perception de déformation du plan sera plus précise ;
- (e) Si le signe des disparités verticales n'est pas congruent, en termes de sens de profondeur par rapport au plan de fixation, avec le signe des disparités horizontales (en rouge sur la Figure 69), la sensibilité aux déformations de surface sera moins grande.

Disparités horizontales	Croisées <i>Relief en avant</i>		Homonymes <i>Relief en arrière</i>	
	+ congruent	+ conflit	+ conflit	+ congruent
	- conflit	- congruent	- congruent	- conflit
Disparités verticales				
	+ conflit	+ congruent	+ congruent	+ conflit
	- congruent	- conflit	- conflit	- congruent

Figure 69 - Représentation schématique des rapports (congruent ou conflit) entre le signe de la disparité horizontale (croisée ou homonyme) dans tout le champ et le signe de la disparité verticale (positif ou négatif), selon le quadrant du champ visuel considéré.

A partir de ces observations tirées des expériences psychophysiques, les disparités binoculaires introduites dans le champ visuel par des verres ophtalmiques unifocaux peuvent être étudiées dans leurs influences sur la perception du relief et de la profondeur. Les différentes valeurs des gradients de disparité horizontale et des disparités verticales introduites par différents couples de verres ophtalmiques sont résumées dans le tableau de l'Annexe 18, en tenant compte des aspects importants de l'analyse décrit ci-dessus.

## IV.2 Comparaison des disparités binoculaires calculées avec les seuils mesurés

### IV.2.1 Les disparités verticales

Les disparités verticales maximales introduites par les verres ophtalmiques sont souvent supérieures à celles que nous avons appliquées expérimentalement : pour les couples de verres non galbés de  $\pm 2,00$  dioptries, la valeur maximale est proche de valeurs testées pour des disparités verticales dans un autre plan de profondeur ; pour les autres exemples traités, la disparité verticale maximale est supérieure, voire très supérieure pour les anisométries, aux valeurs que nous avons testées expérimentalement. Les signes sont congruents par rapport au signe des disparités horizontales dans les cas d'isométries sphériques et cylindriques directes ou inverses. Les signes congruents signifient que, par exemple, si la disparité horizontale est croisée sur tout le champ, les disparités verticales seront positives dans les quadrants supérieur gauche et inférieur droit, et négatives dans les quadrants supérieur droit et inférieur gauche. Les signes sont en conflit si les signes de la disparité verticale décrits ci-dessus sont combinés avec des disparités horizontales homonymes. C'est le cas des couples de verres galbés. Pour les couples astigmatiques obliques et les anisométries, les signes sont également en conflit. Par conséquent, les effets observés expérimentalement selon les signes de disparité verticale congruents ou en conflit sont renforcés sur les verres par des valeurs de disparité verticale supérieures. L'exemple de l'anisométrie étudiée est intéressant puisqu'il

introduit des disparités verticales qui présentent une variation verticale continue, se rapprochant d'un gradient vertical de disparité verticale. Ce type de variation des disparités verticales produit approximativement le phénomène étudié sous le nom d'effet induit (cf. Chapitre 1), dont la perception d'un plan frontal est celle d'un plan orienté selon un axe vertical. Il s'agit de la perception que produiraient ces disparités verticales introduites seules dans le champ visuel. Les verres corrigeant un astigmatisme oblique introduisent également des disparités verticales de variation continue, mais horizontale dans ce cas, correspondant approximativement à un gradient horizontal de disparité verticale. Un gradient horizontal de disparité verticale, ou cisaillement vertical, entraîne une perception d'inclinaison autour d'un axe horizontal du plan frontal (Howard et Kaneko, 1994). Cette perception est semblable à celle produite par un gradient verticale de la disparité horizontale ou un cisaillement horizontal (Berends et Erkelens, 2001).

Les disparités verticales présentent donc des signes en correspondance avec les disparités horizontales, sur l'ensemble du champ visuel, soit les signes sont uniquement congruents, soit uniquement en conflit. Les valeurs maximales de disparités verticales vont de 3,5 à 132 minutes d'arc selon le cas, ce qui est supérieur aux valeurs que nous avons testées. Pour les verres ophtalmiques unifocaux, les disparités verticales, sur tout le champ visuel binoculaire, vont donc avoir le même effet sur les disparités horizontales, soit de renforcement de la déformation en profondeur par rapport au plan fixé, soit de diminution de la déformation.

#### **IV.2.2 Etude de la combinaison des disparités horizontales et verticales**

D'une manière générale, les disparités verticales sont supérieures aux valeurs que nous avons utilisées dans les expériences, alors que les disparités horizontales, en gradient de disparité, sont inférieures aux seuils obtenus. Ce qui signifie que pour les couples de verres ophtalmiques, les disparités verticales, quand elles sont congruentes avec les disparités horizontales, indiquent un plan de profondeur encore plus en avant ou en arrière que la profondeur produite par la disparité horizontale. Ce sont les conditions, expérimentalement, où les seuils de tolérance sont les plus faibles : quand les disparités horizontales croisées sont combinées avec des disparités verticales correspondant à un plan vers l'avant, ou les disparités homonymes avec des disparités verticales pour un plan vers l'arrière. Les cas de signes congruents sont observés pour les couples isométriques non galbés. Les valeurs maximales mesurées dans nos exemples sont inférieures aux seuils de tolérance en gradient de disparité horizontale en fonction de l'excentricité. Cependant, les disparités verticales plus importantes peuvent encore diminuer ces seuils. Elles renforcent donc l'effet que peut produire la disparité horizontale.

Dans le cas où les disparités sont en conflit, les disparités verticales entraînent une augmentation des seuils de tolérance en gradient de disparité horizontale. Pour les verres ophtalmiques, les signes sont en conflit pour les anisométries, les astigmatismes obliques et les verres galbés. La combinaison des disparités horizontales et des disparités verticales correspond au cas où la sensibilité aux disparités horizontales périphériques est diminuée : si le sens de relief induit par les disparités verticales est opposé à celui induit par les disparités horizontales, le seuil de détection d'une déformation de surface, en gradient de disparité horizontale, est plus élevé, la sensibilité et donc la tolérance est plus grande. Les disparités verticales vont réduire l'effet produit par les disparités horizontales. Dans ces exemples de conflit des disparités, les disparités horizontales sont généralement élevées, avec des disparités verticales également importantes, il s'agit de la meilleure configuration puisque les seuils de tolérance seront élevés. Les disparités verticales vont donc dans le sens d'une compensation des disparités horizontales élevées. Ainsi, pour l'exemple de l'anisométrie, la valeur maximale de 0,58 minute d'arc par degré pourrait être inférieure aux seuils de tolérance, compte tenu de l'importance des disparités verticales en conflit (de valeur maximale 132 minutes d'arc).

### **IV.3 Conclusion sur les disparités introduites par les verres ophtalmiques**

Nous n'avons pas étudié tous les exemples de corrections des amétropies par des verres ophtalmiques unifocaux, car il existe une combinaison de prescriptions entre l'œil droit et l'œil gauche très vaste : d'environ -20 dioptries à +20 dioptries pour la sphère ; d'environ -6,00 dioptries à +6,00 dioptries pour le cylindre, avec des axes compris entre 0 et 180° ; à cela s'ajoute les paramètres de montage (galbe, angle pantoscopique, etc.) ; les deux yeux pouvant avoir des corrections différentes (anisométrie jusqu'à 5 dioptries environ). Pour simplifier l'analyse, nous avons choisi des exemples relativement caractéristiques donnant un premier aperçu des patterns de disparités binoculaires introduits par les verres ophtalmiques. Ces exemples montrent que les disparités horizontales, en termes de gradient, peuvent être inférieures aux seuils de tolérance, voire même aux seuils justes discriminables, mais peuvent également s'en approcher. De plus, pour des corrections plus importantes les disparités horizontales peuvent être supérieures aux seuils, en particulier pour les verres positifs supérieurs à 8,00 dioptries. Par ailleurs, pour les disparités verticales, ce n'est pas tant leur valeur qui compte mais leur signe par rapport aux disparités horizontales, sachant que, plus leur valeur est élevée, plus l'effet est renforcé. On observe ainsi que les disparités horizontales et verticales sont congruentes pour les verres sphériques isométriques ou les verres cylindriques directs ou inverses, ses deux composantes indiquent donc une profondeur par rapport au plan de fixation dans la même direction. Par contre, pour certaines corrections, les disparités horizontales, qui peuvent être plus importantes, sont combinées avec des disparités

verticales en conflit, permettant de « contrarier » les effets tridimensionnels de la disparité horizontale. C'est donc le cas idéal, puisque les disparités horizontales associées avec des disparités verticales en conflit seraient plus facilement tolérées.

Notons que les disparités horizontales comme verticales sont relativement faibles au niveau du champ visuel central et elles augmentent vers la périphérie. La présence de disparités verticales, notamment, pourrait entraîner des problèmes de fusion des disparités. Mais la répartition des disparités, avec l'augmentation des aires fusionnelles de Panum vers la périphérie, devrait permettre la fusion, à moins d'une augmentation très importantes comme c'est le cas par exemple pour l'anisométrie. D'une manière générale, les disparités dans le champ visuel doivent être fusionnées, mais il ne serait pas surprenant que dans les cas particulier, la fusion soit difficile, voire impossible. Si la fusion n'est pas possible, le système visuel décidera de supprimer l'image d'un œil pour éviter la diplopie.

D'autre part, on pourrait imaginer que les porteurs de fortes corrections en permanence, s'habituent aux disparités introduites, mais de ce fait modifient leurs seuils de détection d'une déformation de surface. Les mêmes expériences réalisées sur des observateurs habituellement porteurs de fortes corrections pour mettre en évidence des seuils plus élevés globalement que les seuils des présentes expériences.

### ***V Discussion générale et conclusion sur le rôle des disparités verticales***

Lors de la première expérience introduisant des disparités verticales, nous avons observé que si les disparités verticales sont calculées pour une forme obtenue avec des disparités horizontales, elles peuvent améliorer la perception de cette forme quand les deux composantes de disparité sont congruentes (calculées pour la même forme). Par contre, si les disparités verticales sont en conflit avec les disparités horizontales (calculées pour la forme opposée), elles peuvent détériorer la perception de la forme obtenue par les disparités horizontales.

La seconde expérience a permis d'ajouter que la perception de la déformation produite par des disparités horizontales peut être améliorée avec des disparités verticales correspondant à la même forme placée du même côté du plan de fixation (en profondeur). Et d'autre part, elle peut être détériorée par des disparités verticales correspondant à la même forme placée de l'autre côté du plan de fixation.

Dans le premier cas, nous avons créé un conflit complet entre les disparités horizontales et les disparités verticales, puisque les formes utilisées pour le calcul des unes et des autres étaient complètement opposées par rapport au plan de fixation : formes convexe/concave en miroir avec la zone centrale dans le plan de fixation. Le conflit portait sur la forme et sur la profondeur périphérique. Dans le second cas, le conflit entre les disparités

horizontales et les disparités verticales n'avait plus lieu sur la forme, la forme était exactement la même, soit concave soit convexe pour le calcul des deux composantes de la disparité. Par contre, la profondeur était différente pour toute la figure. Il s'agissait uniquement d'un conflit de profondeur par rapport au plan de fixation (en avant ou en arrière).

Les résultats de la première expérience ont mis en évidence le fait que la perception de la déformation du plan se faisait à partir des disparités horizontales. Dans les cas de conflit de forme entre les deux composantes de la disparité, les réponses des observateurs correspondaient à la forme produite par les disparités horizontales. Un observateur a indiqué sa sensibilité aux disparités verticales par la difficulté dans certains cas de répondre sur la concavité/convexité complète du plan. D'après la description de cet observateur, l'influence des disparités verticales se situait en grande périphérie du stimulus. Aussi peut-on dire que l'information sur la forme tridimensionnelle, sur l'ensemble du champ visuel, est donnée par les disparités horizontales. Ce sont les disparités horizontales qui créent la perception de relief. Mais les disparités verticales peuvent interagir avec les disparités horizontales sur la perception de profondeur pour des grandes excentricités.

Dans ces deux expériences, nous avons observé que les disparités verticales facilitent la perception tridimensionnelle de la déformation produite par les disparités horizontales soit quand elles correspondent exactement à la même forme tridimensionnelle et au même plan de profondeur, soit quand elles correspondent à la même forme tridimensionnelle mais dans un plan de profondeur de même direction (avant / arrière) par rapport au plan de fixation. Les disparités verticales améliorent la perception du relief produit par les disparités horizontales quand celles-ci sont de même signe de profondeur par rapport au plan de fixation.

Enfin, la dernière observation est que les disparités verticales peuvent diminuer la sensibilité à une déformation induite par les disparités horizontales quand ces deux indices de disparité sont en conflit au niveau du plan de profondeur de la forme tridimensionnelle de chacun d'eux par rapport au plan de fixation. Dans ce cas, les disparités verticales détériorent la perception du relief produit par les disparités horizontales quand elles indiquent un sens de profondeur opposé par rapport au plan de fixation à celui des disparités horizontales.

De plus, les observateurs ont indiqué, lors de l'expérience avec les disparités horizontales seules (Chapitre 4), que leur perception de la déformation était plutôt le centre que la périphérie du stimulus qui « se détachait » du plan de l'écran (avançait ou s'éloignait par rapport à eux). Or, les disparités horizontales étaient appliquées de telle sorte qu'elles soient plus importantes en périphérie et donc que la modification de profondeur se produise au niveau de la périphérie. Le disque central étant de disparité horizontale ajoutée nulle, il devait théoriquement être perçu dans le plan de l'écran. Cette perception erronée du plan exact de profondeur de la forme par les disparités horizontales seules nous indique que les disparités horizontales permettent la perception tridimensionnelle des formes, mais peuvent se

tromper quant à la position de cette forme en profondeur. Sans éléments permettant de localiser le plan de convergence des yeux et avec des disparités horizontales périphériques, le système visuel n'a pas une indication précise du plan de convergence réel et donc de la convergence des yeux. Par contre, par les disparités verticales, le système visuel ne définit pas une forme précise mais un sens de profondeur par rapport au plan de fixation.

L'expérience sur la combinaison des deux composantes de la disparité indiquant des plans de profondeur différente nous permet de penser que les disparités verticales, sur l'ensemble du champ visuel, donnent une indication sur le plan de profondeur de la forme tridimensionnelle. En effet, si les disparités verticales correspondent à un plan de profondeur plus éloigné du plan de fixation que celui des disparités horizontales, elles accentuent la profondeur en périphérie du stimulus, augmentant la déformation et la rendant plus rapidement perceptible. C'est pourquoi les seuils sont les plus faibles pour des disparités verticales d'un plan de profondeur de même direction mais plus éloigné du plan de fixation. Ce n'est donc pas la forme tridimensionnelle (concave / convexe) qui produit le conflit, mais c'est la répartition des disparités verticales périphériques et leur signe, en termes de profondeur par rapport au plan de fixation.

D'après nos deux hypothèses initiales, les disparités verticales ne sont pas utilisées dans la perception des formes tridimensionnelles. Mais, en grande périphérie, elles peuvent modifier sensiblement la forme tridimensionnelle, en particulier pour des individus sensibles aux disparités verticales. Par contre, elles serviraient plus particulièrement à évaluer la distance de fixation.

Les disparités horizontales et verticales auraient donc chacune un rôle bien précis dans la perception de la profondeur sur l'ensemble du champ visuel : les disparités horizontales permettraient de définir, dans le champ visuel, une forme tridimensionnelle ; les disparités verticales seraient traitées de façon plus globale, elles indiquent au système visuel la distance en profondeur par rapport au plan de fixation. En d'autres termes, les disparités verticales sont un indice de la distance de l'observateur par rapport à la scène tridimensionnelle, et plus précisément de la position des yeux de l'observateur par rapport aux objets.

Dans la perception de la profondeur sur l'ensemble du champ visuel, les disparités horizontales permettent donc de percevoir la forme 3D et les disparités verticales viennent définir la distance en profondeur de cette forme par rapport au plan de fixation et donc par rapport à l'observateur. En association avec l'indice de vergence qui donne l'angle des axes visuels, donc le plan de fixation, l'indice de disparité verticale précise la géométrie des yeux. L'indice de vergence des yeux est donné en partie par les muscles extra-oculaires et la décharge corollaire (Bishop, 1994 ; cf. Chapitre 1).

Enfin, ces expériences semblent montrer également que le traitement des disparités verticales, en interaction avec des disparités horizontales, dans le champ visuel très périphérique pouvaient être local : les disparités verticales peuvent diminuer la perception de profondeur périphérique induite par les disparités horizontales quand leurs signes sont opposés, en particulier chez des observateurs sensibles aux disparités verticales. Cette première conclusion vient renforcer les précédents résultats de Bishop (1996) qui conclut que des manipulations de la disparité verticale peuvent produire des effets locaux sur la profondeur. De même, Matthews et al. (2003) et Ito (2005) suggèrent que les disparités verticales peuvent s'ajouter localement aux disparités horizontales. Par notre observateur particulièrement sensible aux disparités verticales, cet effet local a été mis en évidence uniquement en grande périphérie du champ visuel.

Mais le traitement des disparités verticales est principalement global : des disparités verticales dans tout le champ visuel périphérique donnent une indication de la position en profondeur par rapport à l'observateur d'une forme tridimensionnelle définie par des disparités horizontales. Plusieurs auteurs ont précédemment précisé que les disparités verticales, présentes sur l'ensemble du champ visuel, donnent des informations sur la distance absolue d'une surface (Gillam et Lawergren, 1983 ; Rogers et Bradshaw, 1993 ; Duke et Howard, 2005). L'indication de position de la forme ou d'une surface par rapport à l'observateur correspond à une indication de distance absolue. Nous avons également proposé que les disparités verticales indiquent à l'observateur la position d'une forme, ou d'une surface, par rapport au plan de fixation, il ne s'agit pas de distance relative par rapport au plan de fixation, puisque ce dernier n'est pas nécessairement matérialisé. Le plan de fixation est un référentiel de fixation pour l'observateur, il marque le plan de convergence des yeux. Comme pour la classification des disparités horizontales en disparité absolue ou relative, la distance absolue peut être considérée comme la distance d'un objet par rapport au plan de fixation (correspondant au point de fixation pour les disparités). La distance relative est, elle, la distance de deux surfaces entre elles, indépendamment du plan de fixation. Les disparités verticales indiquent donc la distance absolue d'une surface, ou d'une forme tridimensionnelle.



## Chapitre 6. Synthèse des résultats et Conclusions

Cette dernière partie est une synthèse des résultats présentés dans les deux chapitres précédents aboutissant à des hypothèses sur le traitement des disparités horizontales et verticales réparties dans le champ visuel. La compréhension des interactions entre les disparités horizontales et les disparités verticales nous a notamment permis d'analyser les disparités binoculaires introduites par les verres ophtalmiques unifocaux. Seuls les résultats majeurs sont repris et discutés dans ce chapitre. Enfin, nous verrons que la décomposition habituelle des disparités binoculaires en deux composantes, horizontale et verticale, pour l'étude des disparités propose une analyse intéressante des disparités des verres ophtalmiques. Cette décomposition permet également de définir deux indices de perception de la profondeur et du relief.

### ***I Intérêt de l'étude***

L'étude des disparités binoculaires dans le champ visuel périphérique s'est généralement résumée à la détermination des différents horoptères, selon le critère choisi (Ogle, 1950; Tyler, 1983; Drobe et Monot, 1997), ou à l'étude du traitement des disparités verticales sur un large champ (Rogers et Bradshaw, 1993 ; Kaneko et Howard, 1997). Pourtant, la zone de recouvrement binoculaire occupe une grande partie du champ visuel, environ 120° horizontalement et la totalité dans le méridien vertical. La vision stéréoscopique centrale, ou fovéale, est importante pour une bonne appréciation des distances et profondeurs, en particulier pour les actions dirigées. La vision stéréoscopique périphérique n'en est pas moins utile, dans l'évitement d'obstacles par exemple.

Tout d'abord, du point de vue de la santé publique, la vision stéréoscopique périphérique est nécessaire pour percevoir les obstacles dans le champ visuel. Chez les personnes âgées, le risque de chutes est considérable et ses conséquences en sont désastreuses. Si le facteur de risque de chutes est accentué par des difficultés au niveau de la stabilité posturale chez ces personnes, la cause de la chute est généralement liée à la vision, et particulièrement dans le champ visuel périphérique (Freeman *et al.*, 2007). Une bonne vision binoculaire périphérique permet d'apprécier la distance d'un objet à contourner.

D'autre part, des problèmes de tolérance des verres ophtalmiques existent. Nous avons vu l'exemple des verres unifocaux qui introduisent des disparités binoculaires dans le champ

visuel, et particulièrement dans la périphérie du champ visuel binoculaire. Ces disparités binoculaires peuvent entraîner des gênes pour les porteurs dans leur vision périphérique, et modifier leur perception de la profondeur. Ces gênes sont également de l'ordre de la santé publique.

Enfin, du point de vue fondamental, les interactions entre les disparités horizontales et verticales sur l'ensemble du champ visuel ont été peu étudiées et semblent controversées quant à l'information extraite des disparités verticales (Gårding *et al.*, 1995 ; Duke et Howard, 2005). Les précédentes études différencient l'estimation de la distance de l'estimation de la convergence des yeux. Cette étude apporte un autre regard sur la combinaison des disparités horizontales et verticales dans le cadre de perception de déformation de surfaces planes et sur le rôle de la disparité verticale.

Les principaux résultats des études et de l'application aux verres optiques unifocaux, présentées dans ce mémoire, sont maintenant synthétisés et discutés point par point.

## **II La méthode**

La méthode psychophysique d'ajustement ascendant que nous avons mise en place est particulièrement adaptée à notre problématique, elle présente pourtant quelques aspects critiquables. Cette méthode est connue pour donner des seuils plus élevés qu'une méthode de stimuli constants. Les deux méthodes ne mesurent pas précisément les mêmes seuils, nous détaillerons ce point ci-après. Les seuils obtenus avec la méthode de stimuli constants pour une même disposition des disparités sont inférieurs à ceux obtenus par notre méthode d'ajustement. Cependant, pour une étude sur un large champ visuel, les contraintes matérielles limitent la résolution angulaire et rendent plus difficile l'application de disparités aussi petites que celles normalement perçues avec une méthode de stimuli constants. De plus, pour obtenir le même nombre de données de gradient de disparité en fonction des différentes excentricités, la méthode de stimuli constants plus couteuse en termes de temps aurait demandé un investissement très important des observateurs (environ 18 fois plus de sessions pour obtenir la même quantité de données).

Les seuils de ces deux méthodes ne mesurent pas les mêmes seuils, ou la même sensibilité : les disparités présentées brièvement en stimuli constants permettent d'obtenir des seuils juste perceptibles, et les disparités introduites progressivement fournissent des seuils de tolérance. Par leur mode de présentation et les seuils obtenus, ces deux méthodes peuvent être rapprochées de la mise en évidence du phénomène d'hystérésis dans la vision stéréoscopique : avec l'augmentation progressive des disparités, la perception de plan fronto-parallèle est

maintenue jusqu'à une valeur de disparité plus élevée que la valeur de disparité introduite brièvement qui produit une déformation du plan.

De plus, la méthode de stimuli constants fournit un seuil de perception de planéité. Autour de cette perception de planéité, deux seuils de discrimination de déformation concave ou de déformation convexe peuvent être estimés. Cette méthode s'apparente plutôt à un moyen de déterminer l'horoptère correspondant au plan fronto-parallèle apparent. Par ailleurs, le fort pourcentage de réponse dans la bonne direction, correspondant aux seuils obtenus par la méthode d'ajustement, confirme le rôle important de l'adaptation dans la méthode d'ajustement.

Enfin, les conditions expérimentales de notre méthode d'ajustement se rapprochent plus de conditions naturelles que celles de la méthode de stimuli constants. En particulier, dans l'application aux verres ophtalmiques, les disparités binoculaires introduites par ces verres sont maintenues en permanence dans le champ visuel. Seul le moment où le porteur change ses lunettes peut s'apparenter à la présentation de stimuli constants, mais, à moins d'ôter ses lunettes immédiatement après, les disparités introduites sont maintenues dans le champ et le porteur s'y adapte. Les verres produisent des gradients de disparités dans le champ visuel et les porteurs rapportent des tolérances aux déformations et non une perception instantanée. D'autre part, la mise en évidence d'effets consécutifs de relief après la présentation de disparités dans le champ visuel peut également être un phénomène perceptif relatif aux porteurs de lunettes : en effet, le retrait des lunettes portées depuis un long moment peut produire un post-effet dans la perception du relief et de la profondeur. Aussi la méthode d'ajustement correspond mieux au cadre de l'optique ophtalmique qui nous intéresse.

### ***III Les variations selon l'excentricité***

Les disparités horizontales introduites dans le champ visuel avec une variation continue semblent traitées globalement. Plus précisément, dans la perception de déformations périphériques de surfaces planes, le système visuel traiterait les gradients de disparité horizontale en fonction de l'excentricité à partir de laquelle ils sont appliqués.

La première hypothèse que nous avons faite est que le système visuel traiterait les gradients de disparité horizontale plutôt que les différences de disparité. Néanmoins, notre expérience nous empêche de déterminer précisément si la détection de la déformation est faite sur la variation continue de disparité ou sur la discontinuité de gradient de disparité (Mitchison et Westheimer, 1984) : l'excentricité de départ du gradient de disparité crée un point, ou un cercle, de discontinuité de gradient, entre un gradient nul dans le disque central et le gradient positif ou négatif (en termes de signe de la disparité) appliqué dans l'anneau adjacent. Une expérience présentant une absence de contenu d'information sur le stimulus au niveau de ce cercle de discontinuité pourrait répondre à cette question. Pourtant, un autre lieu

de discontinuité était présent dans la plupart des cas, le cercle d'excentricité de fin de variation, compris également entre le gradient positif ou négatif et un gradient nul en grande périphérie. Les résultats, que ce soit en disparité ou en gradient de disparité, n'étaient pas influencés par ce second lieu de discontinuité. Ceci nous laisse penser que la détection se faisait sur un gradient périphérique de disparité plutôt que par un contraste de profondeur créé aux excentricités de départ et de fin de variation. Les disparités horizontales seraient donc traitées de façon dérivative.

La seconde hypothèse concerne la position dans l'image où s'effectue la détection. L'excentricité de la fin de variation ne semble pas influencer les seuils, tout comme la taille angulaire de l'anneau disparate. Par contre, l'excentricité où commence le gradient de disparité déterminerait le gradient limite de détection : ce gradient de détection d'une déformation de surface augmente avec l'excentricité. Ce qui signifie que l'on tolère un gradient plus important s'il commence en périphérie que s'il commence à proximité du point de fixation. Ce résultat semble cohérent avec la dégradation de la perception du relief avec l'excentricité (Ogle, 1955). De plus, le système stéréoscopique traite de façon plus précise les bords des surfaces, ou discontinuités de disparité, que les gradients de disparité appliqués sur toute la surface (Gillam, Flagg & Finlay, 1984). Dans notre cas, l'excentricité de départ définit une zone (un cercle) de discontinuité de gradient de disparité qui peut expliquer l'influence de cette excentricité d'origine. La détection de déformation de surface doit se produire au niveau de ce cercle de discontinuité ou dans son voisinage.

#### ***IV Les différences croisées - homonymes***

Les seuils de discrimination de déformation en profondeur sont plus faibles pour les disparités horizontales homonymes que pour les disparités croisées. Cette différence a d'abord été observée pour les disparités horizontales seules, puis pour leur combinaison avec les disparités verticales. Il s'agit donc d'une plus grande sensibilité pour les déformations convexes que pour les déformations concaves.

Notons que ce résultat n'a pas été retrouvé pour les deux conditions expérimentales modifiant l'introduction des disparités : (1) la méthode de stimuli constants ne fait pas précisément ressortir la même différence, un seul observateur montre cette tendance, mais l'expérience a été réalisée uniquement pour une position de gradient de disparité, et nous avons vu dans le paragraphe II qu'elle ne mesure pas les mêmes seuils que la méthode d'ajustement ; (2) l'augmentation de la vitesse d'affichage des disparités, également pour une seule condition de localisation du gradient, mais suivant la même procédure d'ajustement, ne met pas en évidence de différences entre les déformations concaves et convexes. Ces deux exceptions semblent indiquer que la différence de sensibilité entre les déformations concaves et les déformations convexes est peut-être influencée par d'autres paramètres, tels que des

facteurs temporels par exemple. Le cas des verres ophtalmiques où les disparités introduites sont maintenues dans le temps doit produire le même phénomène qui permet de tolérer plus de disparités horizontales croisées. Cette observation est intéressante compte tenu du fait que les verres positifs introduisent plus de disparités horizontales, qui dans ce cas sont croisées (cf. Chapitres 2 et 4).

Les explications cognitives de cette sensibilité plus fine aux déformations convexes seraient d'une part une préférence pour les formes convexes qui sont majoritaires dans l'environnement. Il y aurait un « biais » convexe de la nature qui habitue l'individu à être plus performant pour détecter les formes convexes. D'autre part, les observateurs ont signalé leur impression de percevoir le centre s'approcher ou s'éloigner d'eux plutôt que la périphérie. Le jugement de profondeur par les disparités horizontales se fait généralement par rapport à un plan de référence (Mitchison et McKee, 1990). Ce plan de référence n'est pas toujours le plan de fixation (Glennister *et al.*, 2002), ce qui explique pourquoi les observateurs ont rapporté la perception du centre qui se déplace. Les déformations convexes devaient donc donner l'impression d'un objet qui s'approche de l'observateur, et dans ce cas la notion de « survie » peut justifier une réponse plus rapide aux disparités homonymes périphériques. En effet, nous serions plus sensibles aux objets qui s'approchent, semblant potentiellement représentés un danger, qu'aux objets qui s'éloignent de nous, et particulièrement dans l'espace « personnel ».

Une autre explication plus géométrique a été mentionnée, reposant sur la différence de profondeur physique, par rapport au plan de fixation, produite par la même quantité de disparités croisées ou homonymes (Cormack et Fox, 1985 ; Ritter, 1977). Dans ce cas, la perception de déformations se ferait sur la distance réelle en profondeur créée par les disparités. Comme le proposent Patterson *et al.* (1995), la discrimination se ferait plutôt sur le relief que sur la disparité.

Dans la combinaison des disparités horizontales et verticales, cette différence entre les déformations concaves et convexes se produit également quand les disparités sont congruentes. Par contre, il est possible de modifier les seuils des disparités horizontales croisées et homonymes en ajoutant des disparités verticales correspondant à des plans de profondeur différente de telle sorte que la différence soit moindre : l'introduction de disparités verticales correspondant à un plan de profondeur vers l'avant permet de diminuer le seuil des disparités croisées et d'augmenter le seuil des disparités homonymes. Bien que le jugement de la forme concave ou convexe de la déformation se fasse par les disparités horizontales, on observe que les disparités verticales peuvent moduler la sensibilité aux déformations et peuvent la rendre équivalente pour les déformations concaves et les déformations convexes.

La mise en évidence de cellules « near » et « far » sélectives à la disparité horizontale dans les cortex V1 et V2 du macaque et dans les aires 17 et 18 chez le chat (Poggio, Motter, Squatrito et Trotter, 1985 ; Howard, 2002) et de cellules semblables sélectives à la disparité

verticale (Durand *et al.*, 2002) pourrait également expliquer les différences observées. Si le même type de cellules existent chez l'Homme, alors une différence de sensibilité est possible entre les disparités croisées et homonymes d'une part et entre les disparités verticales indiquant une profondeur en avant du plan de fixation et en arrière du plan de fixation d'autre part, puisque ce ne sont pas les mêmes neurones qui interviennent. En effet, selon la combinaison des disparités horizontales et verticales, décrite dans le paragraphe ci-dessus, si les disparités horizontales et les disparités verticales sont congruentes, les cellules sélectives à la disparité verticale de même direction vont renforcer la réponse des cellules sélectives à la disparité horizontale correspondante. Les différences de sensibilité entre les déformations convexes et les déformations concaves peuvent trouver leur origine au niveau des cellules binoculaires qui pourraient être différemment sensibles entre les cellules « far » et « near » sélectives à la disparité horizontale et celles sélectives à la disparité verticale.

En conclusion sur la disparité horizontale, si elle rend compte de variations locales de profondeur, la disparité horizontale n'en est pas moins un signal ambigu dont l'interprétation est dépendante de la disparité verticale.

## ***V La combinaison des disparités horizontales et verticales***

Les disparités verticales peuvent modifier la sensibilité à la disparité horizontale selon leur signe : elles l'améliorent quand elles sont congruentes avec les disparités horizontales ou elles la détériorent quand elles sont en conflit.

L'étude des disparités binoculaires est, la plupart du temps, basée sur la décomposition en une composante horizontale et une composante verticale. Elle permet en effet de mettre en évidence un traitement différent de ces deux composantes, que nous avons également observé avec des expériences s'intéressant aux déformations de surface produites par des disparités sur l'ensemble du champ visuel binoculaire : les disparités horizontales seraient analysées de façon dérivative afin de donner la forme tridimensionnelle, la déformation est perçue avec précision, le relief des différentes zones les unes par rapport aux autres est bien perçu, mais la profondeur de ces zones par rapport au plan de fixation ne l'est pas avec précision ; les disparités verticales traitées globalement dans le champ visuel, quand elles sont cohérentes (nulles au voisinage du point de fixation et plus importantes en périphérie), précisent la profondeur de la déformation périphérique par rapport au plan de fixation. Les deux composantes, quand elles sont congruentes pour une même déformation, permettent ainsi une perception plus précise de la déformation : le relief pur de celle-ci, ou la représentation tridimensionnelle intrinsèque de la déformation, pour un référentiel exocentré, par la composante horizontale ; et la profondeur extrinsèque, pour un référentiel egocentré, par rapport au plan de fixation et donc par rapport à l'observateur, par la composante verticale.

Les disparités horizontales ont besoin d'un plan de référence, défini précisément par rapport à l'observateur, pour qu'elles soient jugées par rapport à ce plan (Mitchison et McKee, 1990 ; Glennerster et McKee, 2004). Dans le champ visuel périphérique, les disparités verticales viennent définir ce plan de référence qui est, dans ce cas, le plan de fixation.

D'autre part, concernant les indices de perception du relief et de la profondeur, les disparités binoculaires sont considérées comme un seul indice. Il est vrai que dans les scènes naturelles, les disparités horizontales et verticales sont toujours congruentes, elles indiquent une même profondeur par rapport au plan de fixation. Dans ce cas, l'étude des disparités binoculaires naturelles ne justifie pas nécessairement la séparation en ces deux composantes. Par contre, les disparités binoculaires introduites par un système optique, des verres ophtalmiques par exemple, peuvent être en conflit dans certains cas. Les deux composantes, quand elles sont ajoutées aux disparités existantes, peuvent être de direction de profondeur opposée par rapport au plan de fixation. Pour ces disparités introduites, la dissociation horizontale / verticale présente donc un intérêt et l'on peut même dire que les disparités horizontales et les disparités verticales sont deux indices binoculaires de perception de la profondeur. Ces deux indices n'interviennent pas de la même manière : la disparité horizontale est plutôt un indice de relief (notion exocentrique) et la disparité verticale un indice de profondeur (notion egocentrique).

Duke et Howard (2005) ont combinés des disparités horizontales et verticales indiquant des plans de profondeur différente. Les auteurs concluent que le système visuel utilise les disparités verticales pour estimer les distances des surfaces plutôt que pour estimer la convergence des yeux. Nos expériences sur la combinaison des disparités horizontales et verticales ne semblent pas indiquer que l'estimation de la distance des surfaces et l'estimation de la convergence des yeux soient indépendantes. En effet, les disparités verticales semblent préciser la distance égocentrique des formes tridimensionnelles définies par les disparités horizontales. La notion de distance égocentrique comprend également une information sur l'état de convergence des yeux. Une estimation de l'angle de vergence peut provenir de la décharge corollaire des muscles extra-oculaires (Bishop, 1994). La disparité verticale est une autre source d'information de la convergence des yeux par l'indication de la distance égocentrique. Les disparités verticales permettent donc de connaître la géométrie des yeux.

Par ailleurs, les études neurophysiologiques ont montré que les neurones de V1 sensibles aux disparités binoculaires encodent la composante horizontale en champ visuel central et les composantes horizontale et verticale en champ visuel périphérique (Durand *et al.*, 2007). Les résultats de notre étude confirment le traitement périphérique de la combinaison des disparités verticales et horizontales. Dans toutes nos expériences, les disparités verticales étaient nulles au niveau du point de fixation et dans les méridiens horizontal et vertical, et elles augmentaient progressivement de manière plus ou moins rapide

vers la périphérie du champ visuel binoculaire. Les disparités horizontales étaient elles aussi nulles au niveau du point de fixation, et augmentaient de façon concentrique vers la périphérie. Dans le champ visuel périphérique, nous avons mis en évidence un traitement conjoint des disparités horizontales et des disparités verticales.

## **VI L'application aux verres ophtalmiques unifocaux**

L'étude des disparités binoculaires appliquées de façon continue sur l'ensemble du champ visuel nous permet également d'envisager les disparités binoculaires introduites par des systèmes optiques à grand champ et plus exactement dans notre cas les verres ophtalmiques. Les verres ophtalmiques sont des « prothèses » oculaires permettant de compenser une anomalie de la réfraction de l'œil. Ils sont donc nécessaires pour une grande partie de la population. Bien qu'il existe d'autres moyens de compensation (lentilles de contact, chirurgie réfractive), les verres ophtalmiques restent la solution de choix, car non invasive et réversible.

En séparant les disparités en leurs deux composantes, horizontale et verticale, on peut étudier différemment ces deux orientations des disparités introduites par les verres ophtalmiques. Le traitement des disparités horizontales se fait sur les gradients de disparités et dépend du point d'excentricité de départ du gradient, alors que le traitement des disparités verticales se fait sur leur signe en fonction de celui des disparités horizontales, qui peut être congruent ou en conflit. Notre application au cas des verres ophtalmiques unifocaux qui introduisent des variations continues des disparités binoculaires est particulièrement intéressante pour envisager les déformations qui peuvent être perçues par les porteurs de correction optique pour compenser une amétropie. Ainsi, dans le cas des verres ophtalmiques, on observe des aspects intéressants de conflit de signes entre les disparités horizontales et les disparités verticales. Ces conflits existent pour des types particuliers de correction, tels que des différences importantes de corrections ou des astigmatismes obliques. Ces types de correction ne sont pas les plus courants, mais ne sont pas pour autant négligeables. Le terme de conflit, utilisé pour indiquer l'interaction entre les signes des deux composantes de la disparité, peut sous-entendre une rivalité, en réalité, d'après nos observations, ces conflits auraient un rôle « bénéfique » pour les disparités introduites puisqu'ils pourraient compenser partiellement les effets perceptifs d'une composante par l'autre composante. Berends et Erkelens (2001) ont mis en évidence la possibilité d'annulation de disparités verticales par des disparités horizontales. Selon Matthews *et al.* (2003), les disparités horizontales et verticales peuvent s'ajouter ou s'annuler localement selon leur signe. Notre étude précise que les effets des disparités horizontales peuvent être renforcés ou minimisés par les disparités verticales selon leur signe dans le champ visuel périphérique.

Enfin, en modifiant certaines caractéristiques physiques des verres ophtalmiques on peut faire varier les disparités binoculaires. Par exemple la modification de la base (ou le rayon de courbure de la face avant) peut modifier sensiblement les disparités horizontales et verticales : l'augmentation de la base (ou la diminution du rayon de courbure de la face avant) permet de diminuer les disparités horizontales, en particulier dans le méridien horizontal, et d'augmenter légèrement les disparités verticales. Le fait de diminuer les disparités horizontales semble intéressant, cependant, si les disparités verticales sont de même signe, et si elles augmentent parallèlement, l'intérêt reste faible. Par contre, si on réussit à diminuer les disparités horizontales et augmenter des disparités verticales en conflit, on renforce l'effet produit par la diminution des disparités horizontales. En effet, l'augmentation de la base choisie pour les deux verres anisométriques diminue sensiblement les disparités horizontales et augmente sensiblement les disparités verticales, ce qui peut être utile compte tenu de l'importance des disparités pour ces corrections. En théorie, la base choisie pour des couples de verres anisométriques est la base la plus plate (de plus grand rayon de courbure), donc la plus faible, mais ne faudrait-il pas préférentiellement choisir la base la plus cambrée (la plus grande) pour réduire les effets des disparités binoculaires. L'esthétique et l'épaisseur des verres sont les caractéristiques qui orientent généralement le choix des verres, pouvant aller à l'encontre des bénéfices perceptifs.

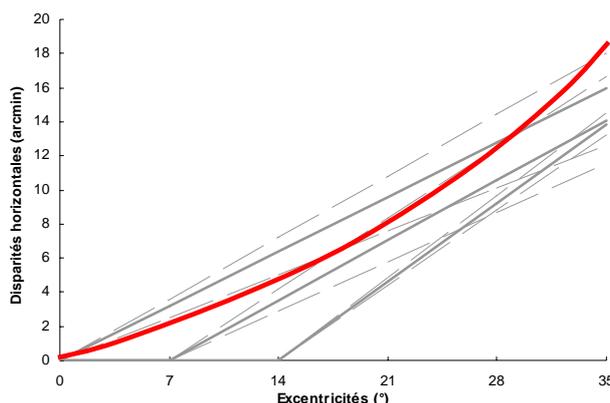
Notons que le protocole de notre expérience ne permettait pas d'effectuer des mouvements oculaires. Les mouvements oculaires, et particulièrement des saccades, pourraient produire un abaissement des seuils. Cependant le pattern de disparité produit par des verres est modifié également par les mouvements oculaires, même si les verres ne bougent pas mais uniquement les yeux. Le point de fixation étant modifié, en principe la fusion des images au point de fixation implique l'absence de disparité sur ce point fixé, pour cela les disparités autour ne sont plus précisément les mêmes car les axes visuels ne croisent plus les mêmes points des verres. Lors des mouvements oculaires le système visuel recalcule le nouveau pattern de disparités autour du point de fixation.

Pour conclure, la réalité des verres ophtalmiques portés pour regarder des scènes visuelles tridimensionnelles ne correspond pas précisément aux conditions expérimentales, avec un stimulus (RDS) sans indice monoculaire de relief. Néanmoins, la première étape de l'étude consistait à évaluer l'effet des disparités binoculaires sans autre indice de profondeur. En réalité les scènes visuelles naturelles présentent des indices monoculaires de relief (ombres, taille relative des objets, perspective, etc.). Les porteurs de lunettes peuvent percevoir des déformations immédiatement en chaussant leurs lunettes, correspondant à l'ajout brutal de disparités équivalent à une méthode de stimuli constants. Cependant après plusieurs heures de port, le système visuel s'habitue à ces déformations et les compense par sa connaissance du monde extérieur. L'aspect cognitif joue un rôle dans la perception de la profondeur, en particulier derrière des verres ophtalmiques. Par ailleurs, nous avons mis en

évidence des effets consécutifs à la présentation pendant quelques secondes d'une déformation de surface. Ces effets consécutifs de relief seront probablement d'autant plus perceptibles par les porteurs de lunettes ôtant celles-ci qu'ils les portent longtemps. Ainsi au retrait des verres ophtalmiques, pendant un court instant l'individu pourra percevoir la déformation inverse de celle produite par ces verres, mais cette perception déformée est de courte durée, car dans ce cas également, le cerveau a une connaissance précise de son environnement sur le plan tridimensionnel et il rétablit la perception visuelle. Dans ces deux cas, à la pose et au retrait des verres ophtalmiques, le cerveau analyse les différents indices qu'il a en sa possession (monoculaires, cognitifs et binoculaires) et il traduit cela par une perception tridimensionnelle relativement proche de la réalité. L'utilisation des indices cognitifs correspond à un processus *top-down*. Ces indices cognitifs permettent au porteur de lunettes de s'habituer à leur verre plus ou moins rapidement.

L'habituation aux verres ophtalmiques se fait par une recherche de l'invariance : lors des mouvements de la tête, en principe les objets ne doivent pas se déplacer. Les verres ophtalmiques entraînent une déformation « irréaliste » des objets avec le mouvement de la tête et c'est ce que le porteur cherche à compenser. Avec des verres cylindriques, par exemple, les rotations de la tête autour de l'axe horizontal de regard produisent initialement une distorsion importante de la scène visuelle. Puis des modifications perceptuelles tendent à restaurer l'invariance métrique des objets, ou l'indépendance individu / objet (Droulez et Cornilleau, 1986). De cette façon, les porteurs de verres ophtalmiques perçoivent au départ des déformations puis essaient de s'adapter progressivement recherchant la stabilité de l'indice de parallaxe de mouvement.

Finalement, nous avons vu que les disparités horizontales introduites par les verres ophtalmiques sont continues sur tout le champ visuel, la notion d'excentricité de départ ne peut donc réellement être utilisée puisque la variation continue commence au point de fixation. La représentation des seuils en gradient de disparité par la pente de disparité horizontale en fonction de l'excentricité de départ semble mettre en évidence une enveloppe des droites de forme parabolique (Figure 70).



**Figure 70 - Représentation schématique de la parabole hypothétique décrivant les seuils de détection d'une déformation de surface en fonction de l'excentricité.**

Cette parabole représenterait le seuil de détection d'une déformation de surface en disparité en fonction de l'excentricité. Si le gradient de disparité représente la dérivée de la disparité en un point, alors la dérivée d'une fonction parabolique est une fonction linéaire. Nous avons envisagé la possibilité que le gradient de disparité soit une fonction linéaire en fonction de l'excentricité dans la détection de déformation de surface. Alors la disparité pourrait être une fonction parabolique en fonction de l'excentricité de départ. Pour l'application aux verres ophtalmiques, la fonction parabolique des seuils de disparité horizontale en fonction de l'excentricité dans le champ visuel serait peut-être plus adaptée.

## VII Perspectives

La représentation tridimensionnelle, à partir d'images rétiniennes planes, nécessite un traitement par le système visuel de nombreux indices, d'une part des indices monoculaires (picturaux, cinétiques, accommodatifs ; cf. Chapitre 1) et d'autre part des indices binoculaires (disparités, vergence). Les signaux extra-rétiniens (notamment position de l'œil dans l'orbite) viennent compléter cette reconstruction tridimensionnelle et permettent la localisation précise des objets et la planification des actions motrices dirigées.

Nos travaux précisent le traitement des indices binoculaires que sont les disparités horizontales et verticales dans le cas où ces dernières sont ajoutées à un stimulus sans indice monoculaire. Or, les verres ophtalmiques pouvant introduire des disparités binoculaires sont en général portés devant les yeux en toutes circonstances puisqu'ils permettent de compenser un défaut visuel. Les scènes naturelles présentent des indices monoculaires de relief (ombre, occultation, perspective, taille relative, etc.), et des indices binoculaires (disparités) quand elles sont regardées par les deux yeux. Aussi, les disparités binoculaires introduites se superposent à celles existant déjà naturellement et aux indices monoculaires.

Nos travaux peuvent être étendus à l'étude de la combinaison d'indices monoculaires avec les disparités binoculaires pouvant modifier l'influence des disparités sur la perception

de relief et de profondeur. Par exemple, les indices picturaux ont un effet métrique sur la perception de la profondeur en présence d'information de disparité non ambiguë : ils produisent une augmentation du relief perçu pour un signal de disparité donné quand ils sont consistents avec la disparité, et une diminution quand ils sont en conflit (Burge *et al.*, 2005). Le système visuel utiliserait une accumulation d'informations statistiques sur l'environnement naturel.

D'autre part, quand un observateur regarde binoculairement une scène en mouvement, en plus de la disparité binoculaire, la parallaxe de mouvement fournit des informations de relief. Les porteurs de verres ophtalmiques bougent les yeux derrière leurs verres, ils bougent également la tête, produisant un déplacement de la scène visuelle par rapport au système verre-œil. Sachant que la sensibilité aux déformations en profondeur est généralement meilleure quand la disparité et le mouvement sont combinés que pour les disparités seules (Cornilleau-Pérès et Droulez, 1993). D'autre part, la perception de déformations tridimensionnelles est dominée par les indices de texture quand ils sont en conflit avec les indices de mouvement, et particulièrement en grand champ visuel (Cornilleau-Pérès *et al.*, 2002). De plus, le traitement des disparités introduit un biais dans la perception de mouvement en relief résultant probablement d'une intégration temporelle limitée pour les changements de disparités (Lages, 2006). Il peut donc être intéressant d'étudier les effets des disparités binoculaires dans des conditions plus naturelles, où les indices picturaux et de mouvement interfèrent, et particulièrement les interactions entre les disparités et le mouvement.

Enfin, l'analyse des disparités binoculaires des verres ophtalmiques montre que la modification de certaines caractéristiques géométriques, comme la courbure de la face avant, peut modifier sensiblement la quantité de disparités. Ces observations permettent d'imaginer qu'il peut exister des moyens de compenser les effets des disparités horizontales par les disparités verticales.

## Références bibliographiques

- Andrews, T.J., Glennerster, A., Parker, A.J. (2001).** Stereoacuity thresholds in the presence of a reference surface. *Vision Research*, **41**, 3051-3061.
- Backus, B.T., Banks, M.S., Van Ee, R., Crowell, J.A. (1999).** Horizontal and vertical disparity, eye position, and stereoscopic slant perception. *Vision Research*, **39**, 1143-1170.
- Backus, B.T., Fleet, D.J., Parker, A.J., Heeger, D.J. (2001).** Human cortical activity correlates with stereoscopic depth perception. *Journal of Neurophysiology*, **86**, 2054-2068.
- Banks, M.S., Backus, B.T., Banks, R.S. (2002).** Is vertical disparity used to determine azimuth? *Vision Research*, **42**, 801-807.
- Becker, S., Bowd, C., Shorter, S., King, K., Patterson, R. (1999).** Occlusion contributes to temporal processing differences between crossed and uncrossed stereopsis in random-dot displays. *Vision Research*, **39**, 331-339.
- Berends, E.M., Erkelens, C.J. (2001).** Strength of depth effects induced by three types of vertical disparity. *Vision Research*, **41**, 37-45.
- Berthoz, A. (1997).** *Le sens du mouvement*. Paris : Editions Odile Jacob.
- Bishop, P.O. (1994).** Size constancy, depth constancy and vertical disparities: a further quantitative interpretation. *Biological cybernetics*, **71**, 37-47.
- Bishop, P.O. (1996).** Stereoscopic depth perception and vertical disparity: neural mechanisms. *Vision Research*, **36**, 1969-1972.
- Blake, R., Logothetis, N.K. (2002).** Visual competition. *Nature Reviews Neuroscience*, **3**, 13-21.
- Bonnet, C. (1986).** *Manuel pratique de psychophysique*, Armand Colin Editeur, Paris.
- Bourdy, C. (1957).** Contribution à l'étude de la vision binoculaire de l'espace. *Revue d'Optique théorique et expérimentale*, **36**, 570-598.
- Bourdy, C. (1989).** Reconstruction et interprétation 3D en vision binoculaire humaine. Traitement de « l'information disparité ». *Journal of Optics*, **20**, 243-258.
- Bradshaw, M.F., Elliott, K.M., Watt, S.J., Hibbard, P.B., Davies, I.R.L., Simpson, P.J. (2004).** Binocular cues and control of prehension. *Spatial Vision*, **17**, 95-110.
- Bradshaw, M.F., Rogers, B.J. (1999).** Sensitivity to horizontal and vertical corrugations defined by binocular disparity. *Vision Research*, **39**, 3049-3056.
- Burge, J., Peterson, M.A., Palmer, S.E. (2005).** Ordinal configural cues combine with metric disparity in depth perception. *Journal of Vision*, **5**, 534-542.
- Buser, P., Imbert, M. (1987).** *Vision – Neurophysiologie fonctionnelle IV*. Ed. Hermann, Paris.
- Cagenello, R., Rogers, B.J. (1993).** Anisotropies in the perception of stereoscopic surfaces: the role of orientation disparity. *Vision Research*, **33**, 2189-2201.

- Clement, R.A. (1992).** Gaze angle explanations of the induced effect. *Perception*, **21**, 355-357.
- Collewijn, H., Steiman, R.M., Erkelens, C.J., Regan, D. (1991).** Binocular fusion, stereopsis and stereoacuity with a moving head, Chap.7. In: *Vision and visual dysfunction*, Vol.9, Ed. D. Regan, Macmillan Press, London.
- Cormack, R., Fox, R. (1985).** The computation of disparity and depth in stereograms. *Perception and Psychophysics*, **38**, 375-380.
- Cornilleau-Pérès, V., Droulez, J. (1993).** Stereo-motion cooperation and the use of motion disparity in the visual perception of 3-D structure. *Perception and Psychophysics*, **54**, 223-239.
- Cornilleau-Pérès, V., Wexler, M., Droulez, J., Marin, E., Miège, C., Bourdoncle, B. (2002).** Visual perception of planar orientation: dominance of depth cues over motion cues. *Vision Research*, **42**, 1403-1412.
- Cumming, B.G., Johnston, E.B., Parker, A.J. (1991).** Vertical disparities and perception of three-dimensional shape. *Nature*, **349**, 411-413.
- Cutting, J.E., Vishton, P.M. (1995).** Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In: *Perception of Space and motion*, W. Epstein and S. Rogers ed., San Diego, CA: Academic Press, Chap.3, 69-117.
- De Valois, R.L., De Valois, K.K. (1988).** *Spatial Vision*. Oxford University Press, New York.
- Devisme, C., Drobe, B., Monot, A., Droulez, J. (2006a).** Combination of horizontal and vertical disparity gradient with concentric pattern. *Journal of Vision*, **6** (6), 656a.
- Devisme, C., Drobe, B., Monot, A., Droulez, J. (2008).** Stereoscopic depth perception in peripheral field and global processing of horizontal disparity gradient pattern. *Vision Research*, **48**, 753-764.
- Devisme, C., Drobe, B., Monot, A., Giraudet, G., Droulez J. (2006b).** Depth aftereffects influence detection thresholds of concave or convex surface deformation. *Perception*, **35** (Suppl), 32.
- Devisme, C., Drobe, B., Monot, A., Giraudet, G., Droulez J. (2007a).** Les disparités binoculaires des verres unifocaux. *La Revue d'Optométrie*, **23**, 10-24.
- Devisme, C., Drobe, B., Monot, A., Giraudet, G., Droulez J. (2007b).** Horizontal disparity gradient with vertical disparity in different depth planes. *Journal of Vision*, **7** (9), 820a.
- Devisme C., Monot A., Drobe B., Droulez J. (2005).** Influence of visual context on surface deformation perception based on binocular disparity. *Perception*, **34** (Suppl), 114.
- Devisme C., Monot A., Drobe B., Pedrono C. (2004).** Does the perception of surface deformations result from global or local processing of disparity gradient? *Perception*, **33** (Suppl), 93.
- Donders, F.C. (1868).** La vitesse des actes psychiques. *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, **3**, 296-317
- Drobe, B., Miège, C., Pédrone, C., Monot, A. (1997).** Extent of vision areas and determination of iso-perceived depth lines for symmetric fixation, *Optical Society of America, Technical Digest Series*, Vol.1, 194-197.

- Drobe, B., Monot, A. (1997).** Partition of perceived space within the fusional area on the basis of apparent fronto-parallel plane criterion, *Ophthalmic and Physiological Optics*, **17**, 340-347.
- Droulez, J., Cornilleau, V. (1986).** Adaptive changes in perceptual responses and visuomanual coordination during exposure to visual metrical distortion. *Vision Research*, **26**, 1783-1792.
- Duke, P.A., Howard, I.P. (2005).** Vertical-disparity gradients are processed independently in different depth planes. *Vision Research*, **45**, 2025-2035.
- Duke, P.A., Oruç, I., Qi, H., Backus, B.T. (2006).** Depth aftereffects mediated by vertical disparities: Evidence for vertical disparity driven calibration of extraretinal signals during stereopsis. *Vision Research*, **46**, 228-241.
- Durand, J-B., Celebrini, S., Trotter, Y. (2007).** Neural bases of stereopsis across visual field of the alert Macaque Monkey. *Cerebral Cortex*, **17**, 1260-1273.
- Durand, J-B., Zhu, S., Celebrini, S., Trotter, Y. (2002).** Neurons in parafoveal areas V1 and V2 encode vertical and horizontal disparities. *Journal of Neurophysiology*, **88**, 2874-2879.
- Duwear, A.L., Van Den Brink, G. (1981).** What is the diplopia threshold? *Perception & Psychophysics*, **29**, 295-309.
- Fender, D., Julesz, B. (1967).** Extension of Panum's fusional area in binocularly stabilized vision, *Journal of Optical Society of America*, **57**, 819-830.
- Foley, J.M. (1978).** Primary distance perception. In: *Handbook of Sensory Physiology*, Vol. 9, Eds. R. Held, H. Leibowitz and H. Teuber, Berlin: Springer-Verlag, 181,213.
- Foley, J.M. (1991).** Binocular space perception, Chap. 4. In: *Vision and Visual Dysfunction*, Vol. 9, Ed. D. Regan, Macmillan Press, London..
- Fox, R. (1991).** Binocular Rivalry, Chap. 2. In: *Vision and Visual Dysfunction*, Vol. 9, Ed. D. Regan, Macmillan Press, London..
- Friedman, R.B., Kaye, M.G., Richards, W. (1978).** Effect of vertical disparity upon stereoscopic depth. *Vision Research*, **18**, 351-352.
- Freeman, E.E., Muñoz, B., Rubin, G., West, S.K. (2007).** Visual field loss increases the risk of falls in older adults: The Salisbury eye evaluation. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **48**, 4445-4450.
- Gårding, J., Porrill, J., Mayhew, J.E.W., Frisby, J.P. (1995).** Stereopsis, Vertical Disparity and Relief Transformations. *Vision Research*, **35**, 703-722.
- Gantz, L., Patel, S.S., Chung, S.T.L., Harwerth, R.S. (2007).** Mechanisms of perceptual learning of depth discrimination in random dot stereograms. *Vision Research*, **47**, 2170-2178.
- Gillam, B., Chambers, D., Lawergren, B. (1988a).** The role of vertical disparity in the scaling of stereoscopic depth perception: an empirical and theoretical study. *Perception and psychophysics*, **44**, 473-483.
- Gillam, B., Chambers, D., Russo, T. (1988b).** Postfusional latency in stereoscopic slant perception and the primitives of stereopsis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **14**, 163-175.
- Gillam, B., Flagg, T., Finlay, D. (1984).** Evidence for disparity change as the primary stimulus for stereoscopic processing, *Perception & Psychophysics*, **36**, 559-564.

- Gillam, B., Lawergren, B. (1983).** The induced effect, vertical disparity and stereoscopic theory, *Perception and Psychophysics*, **34**, 121-130.
- Glennester, A., McKee, S.P. (1999).** Bias and sensitivity of stereo judgements in the presence of a slanted reference plane. *Vision Research*, **39**, 3057-3069.
- Glennester, A., McKee, S.P. (2004).** Sensitivity to depth relief on slanted surfaces. *Journal of Vision*, **4**, 378-387.
- Glennester, A., McKee, S.P., Birch M.D. (2002).** Evidence for Surface-Based Processing of Binocular Disparity. *Current Biology*, **12**, 825-828.
- Graham, M.E., Rogers, B.J. (1982).** Simultaneous and successive contrast effects in the perception of depth from motion-parallax and stereoscopic information. *Perception*, **11**, 247-262.
- Howard, I. P., Kaneko, H. (1994).** Relative shear disparities and the perception of surface inclination. *Vision Research*, **34**, 2505-2517.
- Howard, J.P. (2002).** Physiology of disparity detection, Chap.6. In: *Seeing in Depth*, Vol.1 Basic Mechanisms, I Porteous, University of Toronto Press, Toronto.
- Howard, J.P., Rogers, B.J. (1995).** Types of disparity, Chap.7 ; Stereo acuity, Chap.5 ; Depth contrast and interactive processes, Chap.12. In: *Binocular Vision and Stereopsis*, Oxford Psychology series n°29, Oxford University Press, Oxford.
- Howard, J.P., Rogers, B.J. (2002).** Stereoacuity, Chap.7 ; Limits of stereoscopic vision, Chap. 19 ; Depth contrast, Chap.22. In: *Seeing in Depth*, Vol.2 Depth Perception, I Porteous, University of Toronto Press, Toronto.
- Hubel, D.H. (1988).** *Eye, Brain, and Vision*. New York : Scientific American Library.
- Hugonnier, R. (1959).** *Strabismes – Hétérophories et Paralysies Oculo-Motrices*, Ed. Masson, Paris.
- Ito, H. (2005).** Illusory depth perception of oblique lines produced by overlaid vertical disparity. *Vision Research*, **45**, 931-942.
- Julesz, B. (1971).** *Foundations of Cyclopean Perception*, University of Chicago Press, Chicago.
- Johnston, E.B. (1991).** Systematic distortions of shape from stereopsis. *Vision Research*, **31**, 1351-1360.
- Kaneko, H., Howard, I.P. (1997).** Spatial Limitation of Vertical-size Disparity Processing, *Vision Research*, **37**, 2871-2878.
- Koenderink, J.J. (1990).** *Solid Shape*, The MIT Press, Massachusetts.
- Lages, M. (2006).** Bayesian models of binocular 3-D motion perception. *Journal of Vision*, **6**, 508-522.
- Lankheet, M.J.M., Lennie, P. (1996).** Spatio-temporal requirements for binocular correlation in stereopsis. *Vision Research*, **36**, 527-538.
- Lee, B. (1999).** After effects and the representation of stereoscopic surfaces. *Perception*, **28**, 1155-1169.
- Lemij, H.G. (1990).** General methods, Chap.3. In: *Asymmetrical human anisometropic – Adaptation of saccades to spectacles*, Rotterdam: Erasmus University. Thesis.

- Legent, F., Perlemuter, L., Quéré, M. (1976).** *Anatomie Enseignement des centres hospitalo-universitaires Tome 3 : Nerfs crâniens et organes correspondants.* Masson.Ed., Paris.
- Levine, M.W. (2000).** *Levine and Shefner's – Fundamentals of sensation and perception.* 3<sup>e</sup> Ed., Oxford University Press.
- Lunn, P.D., Morgan, M.J. (1997).** Discrimination of the spatial derivatives of horizontal binocular disparity. *Journal of the Optical Society of America A*, **14**, 360-371.
- Long, N., Over, R. (1973).** Stereoscopic depth aftereffects with random-dot patterns. *Vision Research*, **13**, 1283-1287.
- Mamassian, P., Goutcher, R. (2001).** Prior knowledge on the illumination position. *Cognition*, **81**, B1-B9.
- Manning, M.L., Finlay, D.C., Neill, R.A., Frost, B.G. (1987).** Detection threshold differences to crossed and uncrossed disparities. *Vision Research*, **27**, 1683-1686.
- Matthews, N., Meng, X., Xu, P., Qian, N. (2003).** A physiological theory of depth perception from vertical disparity. *Vision Research*, **43**, 85-99.
- McKee, S.P. (1983).** The spatial requirements for fine stereoacuity. *Vision Research*, **23**, 191-198.
- Mitchison, G.J., McKee, S.P. (1990).** Mechanisms underlying the anisotropy of stereoscopic tilt perception. *Vision Research*, **30**, 1781-1791.
- Mitchison, G.J., Westheimer, G. (1984).** The perception of depth in simple figure. *Vision Research*, **24**, 1063-73.
- Mueller, C.G., Lloyd, V.V. (1948).** Stereoscopic Acuity for Various Levels of Illumination. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U S A*, **34**, 223-227.
- Nakayama, K. (1983).** Kinematics of Normal and Strabismic Eyes. In: *Vergence Eye Movements: Basics and Clinical Aspects*, Ed. C. Schor and K. Ciuffreda, Butterworth, London-Boston.
- Nielsen, K.R.K., Poggio, T. (1984).** Vertical image registration in stereopsis. *Vision Research*, **24**, 1133-1140.
- Ninio, J. (1981).** Random-curve stereograms: a flexible tool for the study of binocular vision. *Perception*, **10**, 403-410.
- Ogle, K.N. (1950).** Studies of the empirical longitudinal horopter, Chap.4 ; Spatial Localization and stereoscopic vision, Chap.12 ; The induced Effect, Chap.19. In: *Research in Binocular Vision*, Press of W.B. Saunders Company, Philadelphia and London, 173-199.
- Ogle, K.N. (1953).** Precision and validity of stereoscopic depth perception from double images. *Journal of the Optical Society of America*, **43**, 906-913.
- Ogle, K.N. (1955).** Stereopsis and vertical disparity. *A.M.A. Archives of ophthalmology*, **53**, 495-504.
- Ogle, K.N. (1958a).** Note on stereoscopic acuity and observation distance. *Journal of the Optical Society of America*, **48**, 794-798.
- Ogle, K.N. (1958b).** Present status of our knowledge of stereoscopic vision. *A.M.A. Archives of ophthalmology*, **60**, 755-774.

- Panerai, F., Cornilleau-Pérès, V., Droulez, J. (2002).** Contribution of extraretinal signals to the scaling of object distance during self-motion. *Perception and Psychophysics*, **64**, 717-731.
- Patterson, R., Cayko, R., Short, G.L., Flanagan, R., Moe, L., Taylor, E., Day, P. (1995).** Temporal integration differences between crossed and uncrossed stereoscopic mechanisms. *Perception and Psychophysics*, **57**, 891-897.
- Patterson, R., Fox, R. (1984).** The effect of testing method on stereoanomaly. *Vision Research*, **24**, 403-408.
- Patterson, R., Moe, L., Hewitt, T. (1992).** Factors that affect depth perception in stereoscopic displays. *Human Factors*, **34**, 655-667.
- Payne, B.R., Elberger, A.J., Berman, N., Murphy, E.H. (1980).** Binocularity in the cat visual cortex is reduced by sectioning the corpus callosum. *Science*, **207**, 1097-1099.
- Peh, C.H., Panerai, F., Droulez, J., Cornilleau-Pérès, V., Cheong, L.F. (2002).** Absolute distance perception during in-depth head movement: calibrating optic flow with extra-retinal information. *Vision Research*, **42**, 1991-2003.
- Petrov, Y., Glennerster, A. (2004).** The role of a local reference in stereoscopic detection of depth relief. *Vision Research*, **44**, 367-376.
- Piantanida, T.P. (1986).** Stereo hysteresis revisited. *Vision Research*, **26**, 431-437.
- Poggio, G.F., Motter, B.C., Squatrito, S., Trotter, Y. (1985).** Responses of neurons in visual cortex (V1 and V2) of the alert macaque to dynamic random-dot stereograms. *Vision Research*, **25**, 397-406.
- Poggio, G.F. (1991).** Physiological basis of stereoscopic vision, Chap. 11. In *Vision and visual dysfunction*, Vol.9, Ed. D. Regan, Macmillan Press, London.
- Porrill, J., Frisby, J.P., Adams, W.J., Buckley, D. (1999).** Robust and optimal use of information in stereo vision. *Nature*, **397**, 63-66.
- Prince, S.J.D., Rogers, B.J. (1998).** Sensitivity to disparity corrugations in peripheral vision. *Vision Research*, **38**, 2533-2537.
- Rawlings, S.C., Shipley, T. (1969).** Stereoscopic acuity and horizontal angular distance from fixation. *Journal of the Optical Society of America*, **59**, 991-993.
- Richards, W. (1971).** Anomalous stereoscopic depth perception. *Journal of the Optical Society of America*, **61**, 410-414.
- Richards, W., Kaye, M.G. (1974).** Local versus global stereopsis: two mechanisms? *Vision Research*, **14**, 1345-1347.
- Ritter, M. (1977).** Effect of disparity and viewing distance on perceived depth. *Perception & Psychophysics*, **22**, 400-407.
- Rogers, B.J., Bradshaw, M.F. (1993).** Vertical disparities, differential perspective and binocular stereopsis. *Nature*, **361**, 253-255.
- Rogers, B.J., Bradshaw, M.F. (1995).** Disparity scaling and the perception of frontoparallel surfaces. *Perception*, **24**, 155-179.
- Rogers, B., Cagenello, R. (1989).** Disparity curvature and the perception of three-dimensional surfaces. *Nature*, **339**, 135-137.
- Rogers, B.J., Graham, M. (1982).** Similarities between motion parallax and stereopsis in human depth perception. *Vision Research*, **22**, 261-270.

- Rogers, B.J., Graham, M.E. (1983).** Anisotropies in the perception of three-dimensional surfaces. *Science*, **221**, 1409-1411.
- Schor, C.M., Tyler, C.W. (1981).** Spatio-temporal properties of Panum's fusional area. *Vision Research*, **21**, 683-692.
- Seyama, J., Takeuchi, T., Sato, T. (2000).** Tilt dependency of slant aftereffect. *Vision Research*, **40**, 349-357.
- Shipley, T., Rawlings, S.C. (1970).** The nonius horopter – I. History and theory. *Vision Research*, **10**, 1225-1262.
- Tam, W.J., Stelmach, L.B. (1998).** Display duration and stereoscopic depth discrimination. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, **52**, 56-61.
- Taya, S., Sato, M., Nakamizo, S. (2005).** Stereoscopic depth aftereffects without retinal position correspondence between adaptation and test stimuli. *Vision Research*, **45**, 1857-1866.
- Thomas, G., Goldberg, J.H., Cannon, D.J., Hillis, S.L. (2002).** Surface textures improve the robustness of stereoscopic depth cues. *Human Factors*, **44**, 157-170.
- Trotter, Y., Celebrini, S., Stricanne, B., Thorpe, S., Imbert, M. (1992).** Modulation of neural stereoscopic processing in primate area V1 by the viewing distance. *Science*, **257**, 1279-1281.
- Tyler, C.W. (1975).** Spatial organization of binocular disparity sensitivity. *Vision Research*, **15**, 583-590.
- Tyler, C.W. (1983).** Sensory processing of binocular disparity. In *Vergence Eye Movements: basic and clinical aspects*, Eds. C.M. Schor and K.J. Ciuffreda, London: Butterworths.
- Tyler, C.W. (1991).** The Horopter and Binocular Fusion, Chap.2 ; Cyclopean Vision, Chap. 3. In *Vision and visual dysfunction*, Vol.9, Ed. D. Regan, Macmillan Press, London.
- Van den Enden, A., Spekreijse, H. (1989).** Binocular depth reversals despite familiarity cues. *Science*, **244** (4907), 959-961.
- Wall, M., Kutzko, K.E. Balwantray, C., Chauhan, C. (2002).** The relationship of visual threshold and reaction time to visual field eccentricity with conventional automated perimetry. *Vision Research*, **42**, 781-787.
- Watt, S.J., Akeley, K. Banks, M.S. (2002).** Focus cues to display distance affect perceived depth from disparity. *Journal of Vision*, **3**(9), 66a.
- Watt, S.J., Banks, M.S., Ernst, M.O., Zumer, J.M. (2002).** Screen cues to flatness do affect 3d percepts. *Journal of Vision*, **2**(7), 297a.
- Westheimer, G. (1986).** Spatial interaction in the domain of disparity signals in human stereoscopic vision. *Journal of Physiology*, **370**, 619-629.
- Westheimer, G., Levi, D.M. (1987).** Depth attraction and repulsion of disparate stimuli. *Vision Research*, **27**, 1361-1368.
- Westheimer, G., Tanzman, I.J. (1956).** Qualitative depth localization with diplopic images. *Journal of the Optical Society of America*, **46**, 116-117.
- Woo, G.C.S. (1974).** The effect of exposure time on the foveal size of Panum's area. *Vision Research*, **14**, 473-480.
- Zabulis, X., Backus, B.T. (2004).** Starry night: a texture devoid of depth cues. *Journal of the Optical Society of America A*, **21**, 2049-2060.



## Lexique des termes de vision binoculaire

**Axe interoculaire :** ligne joignant les deux yeux.

**Centre de rotation de l'œil :** point central de l'œil autour duquel vont se faire les mouvements de rotation de l'œil, ou centre du repère défini par les trois axes de rotation de l'œil (horizontal, vertical et antéro-postérieur).

**Cyclopéen :** se dit pour des images qui sont vues comme d'un point entre les deux yeux (l'œil cyclope)

**Horoptère :** lieu des points de l'espace dont les images se projettent sur des points rétinien correspondants.

**Inclinaison :** rotation d'un plan par rapport à un axe horizontal (slant en anglais).

**Plan frontal :** plan parallèle au front, à l'axe interoculaire.

**Plan médian :** plan perpendiculaire à l'axe interoculaire au centre des 2 yeux.

**Plan sagittal :** plan perpendiculaire au plan frontal et parallèle au plan médian.

**Orientation :** rotation d'un plan par rapport à un axe vertical (oriented en anglais).

**RDS :** Random Dot Stereogram, Stéréogramme à points aléatoires.

**Disparité ajoutée :** disparité résultante de la différence entre la disparité totale et la disparité produite par la planéité de l'écran de présentation du stimulus (c'est-à-dire la différence par rapport au cercle de Vieth-Müller). La disparité ajoutée du plan de l'écran est nulle, alors que sa disparité totale est non nulle.

**Disparité horizontale croisée :** quand les axes visuels dirigés vers les points correspondants visés par chaque œil vont se croiser en avant du plan de ces deux points. Par définition la disparité croisée est positive. Le terme croisé par opposition à homonyme ne s'emploie que pour les disparités horizontales.

**Disparité horizontale homonyme :** quand les axes visuels dirigés vers les points correspondants visés par chaque œil vont se croiser en arrière du plan de ces deux points. Par définition la disparité homonyme est négative. Le terme homonyme par opposition à croisé ne s'emploie que pour les disparités horizontales.

**Disparité totale :** différence entre l'angle que forme un point avec les points nodaux des deux yeux et l'angle du point de fixation avec les points nodaux.

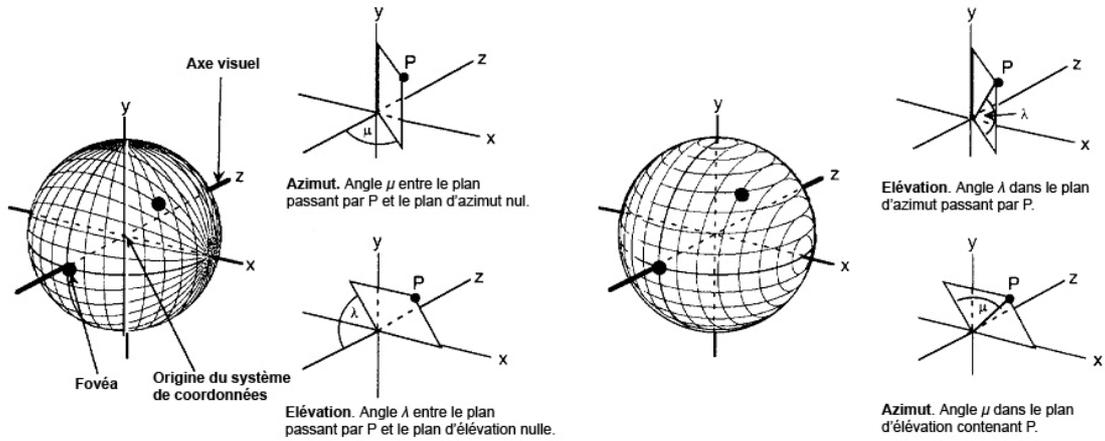
**Points nodaux :** Couple de points conjugués,  $N$  et  $N'$  sur l'axe optique pour lesquels le grandissement angulaire ou rapport de convergence  $G$  est égal à +1, c'est à dire que tout rayon passant par  $N$  en entrée ressort en coupant l'axe en  $N'$  en étant parallèle au rayon d'entrée.



**- Annexes -**

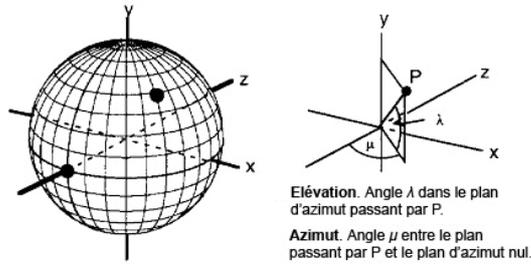


**Annexe 1 - Représentation des différents repères de coordonnées sphériques monoculaires (d'après Howard et Rogers, 2002).**

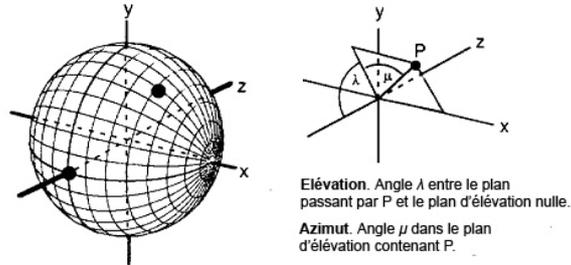


(a) Azimut-longitude. Elévation-longitude.

(d) Azimut-latitude. Elévation-latitude.



(b) Azimut-longitude. Elévation-latitude.



(e) Coordonnées polaires ou système périmétrique.



même valeur absolue, mais des disparités, homonyme ou croisée, totales de valeurs différentes ; de plus, il s'agit d'un calcul théorique du relief, ce qui ne signifie pas forcément que le relief soit perçu par l'observateur à la distance obtenue par le calcul.

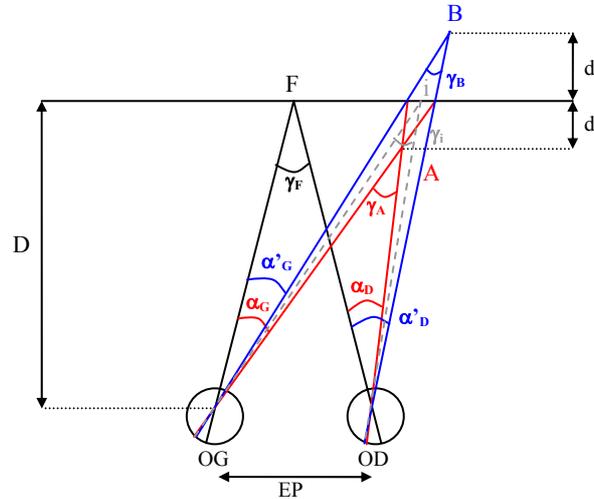


Figure 72 - illustration des relations entre la profondeur physique  $d$  ou  $d'$ , la distance de fixation  $D$ , l'écart interpupillaire ( $EP$ ) et la disparité horizontale des points  $A$  et  $B$ , respectivement  $\alpha_G - \alpha_D$  et  $\alpha'_G - \alpha'_D$ .  $d$  correspondant à la profondeur physique du point  $A$  et  $d'$  à celle du point  $B$ .

D'après la Figure 72, on a :

- $D$ , la distance entre le point de fixation  $F$  et les deux yeux de l'observateur ;
- $EP$ , l'écart interpupillaire ;
- $d$  et  $d'$ , les distances physiques des points  $A$  en disparité croisée et  $B$  en disparité homonyme ;
- $\alpha_G - \alpha_D$  et  $\alpha'_G - \alpha'_D$ , les disparités horizontales des points, respectivement  $A$  et  $B$ .

La relation entre la profondeur physique et la disparité horizontale, donnée par Ritter (1977), est la suivante (il s'agit d'une approximation) :

$$\alpha_G - \alpha_D = \frac{EP \times d}{D^2} \quad (1)$$

sachant que  $\alpha_G - \alpha_D = \gamma_A - \gamma_F$ , il s'agit de la disparité horizontale, dite *totale*, du point  $A$ .

on a ainsi :  $\alpha_G - \alpha_D = \gamma_A - \gamma_F = \frac{EP \times d}{D^2}$

mais également :  $\alpha'_G - \alpha'_D = \gamma_B - \gamma_F = \frac{EP \times d'}{D^2}$

D'autre part, nous nous plaçons dans le cas où les disparités croisées et homonymes sont égales en valeur absolue, étant considérées comme des disparités *ajoutées* ( $\gamma_A - \gamma_i$  ou  $\gamma_B - \gamma_i$ , différentes de la disparité totale définie plus haut). Ceci signifie que :

$$\begin{aligned} \gamma_A - \gamma_i &= -(\gamma_B - \gamma_i) \\ (\gamma_A - \gamma_F) - (\gamma_i - \gamma_F) &= -((\gamma_B - \gamma_F) - (\gamma_i - \gamma_F)) \\ \frac{EP \times d}{D^2} - \gamma_i + \gamma_F &= -\frac{EP \times d'}{D^2} + \gamma_i - \gamma_F \end{aligned}$$

$$\frac{EP}{D^2}(d + d') = 2\gamma_i - 2\gamma_F$$

$$d + d' = \frac{2D^2}{EP}(\gamma_i - \gamma_F)$$

$$d' = \frac{2D^2}{EP}(\gamma_i - \gamma_F) - d$$

Sachant que  $(\gamma_i - \gamma_F)$  est négatif car il s'agit de la disparité horizontale du point i, dans le plan fronto-parallèle de fixation, celle-ci étant homonyme (ce point est en arrière du cercle de Vieth-Müller), donc négative.

Le produit  $\frac{2 \times D^2}{EP}(\gamma_i - \gamma_F)$  sera donc négatif également. Et, comme d correspond à une disparité croisée donc positive, cette distance d sera également positive (d'après la formule (1)). Donc la distance d', correspondant à la profondeur physique de la disparité homonyme, sera négative et supérieure en valeur absolue à la distance d, correspondant à la profondeur physique de la disparité croisée de même valeur absolue.

En conclusion de cette démonstration, l'optique géométrique montre qu'une même valeur absolue de disparité horizontale ajoutée produit une profondeur physique, par rapport au plan de fixation, plus grande pour les disparités homonymes que pour les disparités croisées.

### **Annexe 3 - Programme de calcul des disparités à partir des grilles déformées.**

La fonction de ce programme est, à partir des données d'un programme donnant les distorsions d'une grille régulière au travers d'un verre ophtalmique choisi, de calculer les disparités horizontales et verticales en chaque nœud de la grille définie initialement. A partir des deux grilles déformées, une pour l'œil droit et une pour l'œil gauche, au travers d'un couple de verre, notre programme calcule, pour chaque nœud de la grille initiale, une valeur de disparité horizontale et une valeur de disparité verticale. Par la suite, ce programme devra permettre d'obtenir une carte représentant les disparités schématiquement.

#### ***Présentation du programme de calcul des distorsions***

Pour le calcul des distorsions d'une grille au travers d'un verre ophtalmique, un certain nombre de paramètres sont nécessaires et vont être maintenant définis.

#### **Les paramètres :**

##### *Présentation*

Les paramètres que nous allons décrire sont ceux spécifiques pour le calcul des distorsions, les paramètres d'entrée sont : une grille de départ et une direction du regard ou un point regardé sur la grille. De plus, les paramètres de sortie des données par le programme sont importants.

Une information importante pour les futurs calculs de disparité est le repère utilisé, et plus précisément le centre de ce repère. En effet, pour la définition de la grille initiale et donc également pour les calculs de la grille déformée, le repère utilisé est centré sur un point qui se trouve sur la face arrière du verre testé. On considère ainsi que ce point se trouve à 25 mm en avant du centre de rotation de l'œil (CRO). Les rayons utilisés pour le calcul de la grille déformée se croisent dans le plan de la pupille (au niveau des points nodaux), ce qui est important pour le calcul des disparités binoculaires puisque l'œil ne doit pas bouger derrière le verre (si le calcul était fait en passant par le CRO, les distorsions ne seraient pas les mêmes, car elles seraient calculées pour un œil qui tourne autour du CRO, et donc on ne pourrait pas calculer les disparités résultantes). La position de la pupille est déduite du CRO et de la direction du regard. Le centre du repère utilisé pour définir la direction du point regardé est le CRO.

De plus, les repères utilisés ont la particularité de présenter un axe des  $z$  dirigé vers l'arrière pour les valeurs positives. Ainsi, une grille placée en avant du verre (et de l'œil) aura une coordonnée négative en  $z$ , par exemple (0,0,-4000) pour un point de la grille situé dans l'alignement du CRO et du point de la face arrière, à 4 m du verre. Egalement dans le repère de la grille (lié à la face arrière du verre), le CRO a donc pour coordonnées (0,0,25).

Les autres paramètres nécessaires pour le calcul des distorsions sont les caractéristiques du verre ophtalmique utilisé, non détaillées dans la présente description.

### La grille

Le programme définit tout d'abord une grille initiale. Les paramètres nécessaires à la description d'une grille régulière sont :

- les coordonnées  $x$ ,  $y$  et  $z$  du centre de la grille dans le **repère lié à la face arrière du verre**,
- l'inclinaison (en degré) du plan de la grille par rapport au plan vertical,
- la taille horizontale et verticale (en mm) de la grille,
- le nombre de points horizontaux et de points verticaux (nœuds) de la grille.

La Figure 73 illustre le cas d'une grille de centre  $C$  et inclinée de 36 degrés par rapport à la verticale.

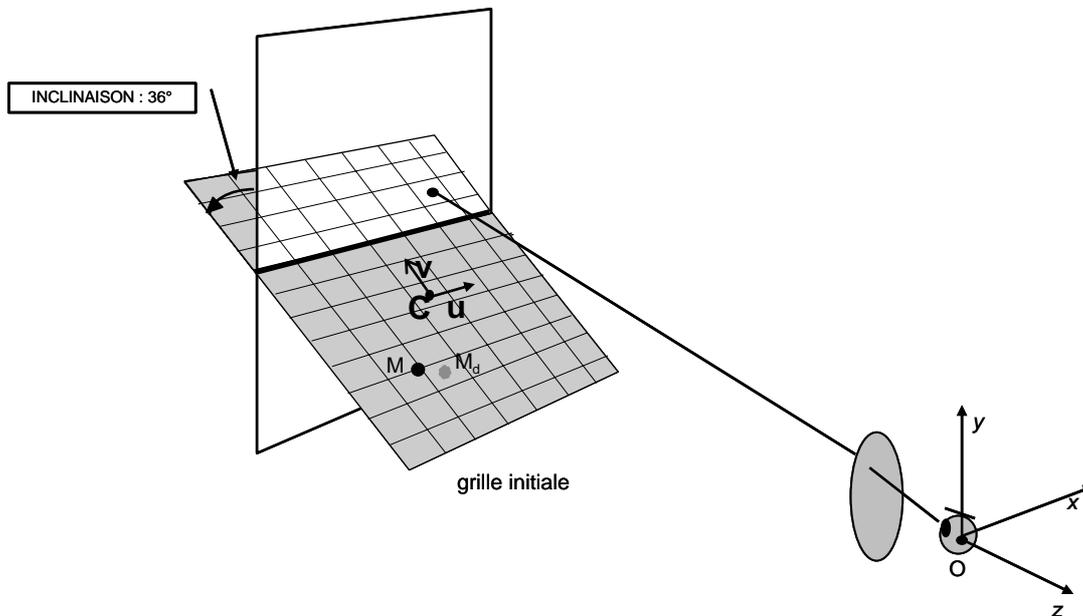


Figure 73 - Exemple de grille

Dans la plupart des cas, nous utiliserons comme grille initiale une grille dans un plan fronto-parallèle, donc non inclinée.

### La direction de regard ou le point regardé

Les paramètres de direction du regard sont notés soit en angulaire (angle alpha et bêta définit plus loin), soit en coordonnées  $(x,y,z)$  par rapport à une direction de regard droit devant, et dans le **repère lié au CRO** (Figure 73). Il est possible de définir une distance  $z$  du plan de projection de la grille déformée, différente du plan de la grille initiale. Dans tous les cas, nous considérerons que la grille déformée est projetée sur le plan de la grille initiale.

### Principe de calcul des grilles déformées

Le programme calcule les déformations périphériques (dus au port d'un verre) d'une grille située sur un plan donné. Pour ce faire, on utilise le **Modèle de vision périphérique** (cf. Figure 73 et Figure 74) : à chaque point de la grille  $M$  est associé un « point perçu »  $M_d$ . Il correspond à l'intersection entre le plan de la grille et la **droite** passant par le centre de la pupille  $P$  et ayant pour direction  $d'_1$  celle du **rayon**, côté œil, reliant le point de la grille  $M$  et le centre de la pupille  $P$ .

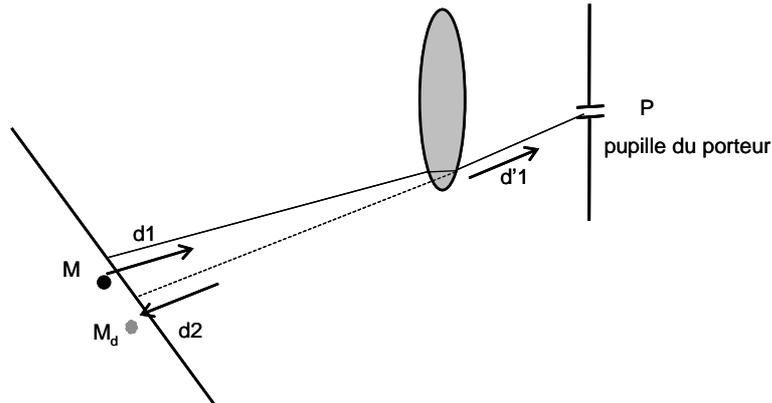


Figure 74 - Modèle de vision périphérique.

On parcourt les points de la grille initiale. Pour chacun d'eux, on calcule le point de la grille déformée correspondant (Sur la Figure 74,  $M$  est le point de la grille initiale et  $M_d$  le point de la grille déformée).

L'affichage se fait sur le plan de projection et dans le repère du plan de projection. Celui-ci peut être soit le plan de la grille initiale, soit un plan vertical (Figure 75). Dans notre cas, la grille initiale était fronto-parallèle et correspondait au plan de projection. Les coordonnées des points de la grille déformée étaient dans le même repère que la grille initiale.

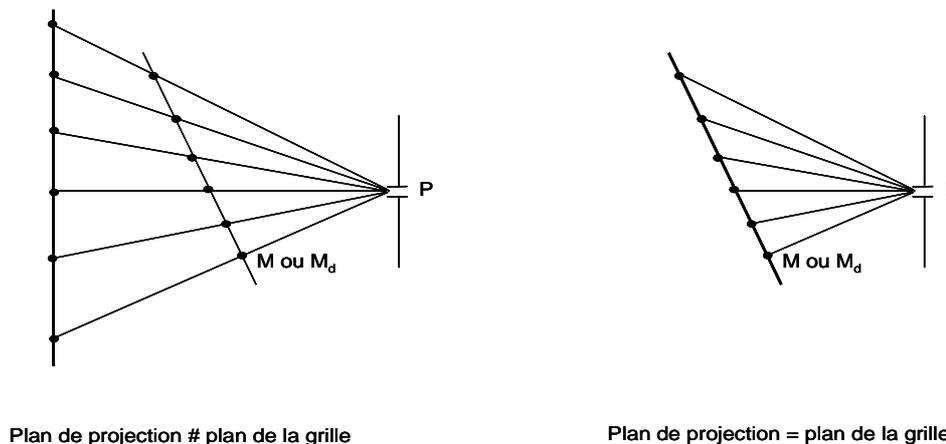


Figure 75 - plans de projection.

On peut afficher ensuite le graphe superposant la grille initiale et la grille déformée. L'affichage à l'écran de ce graphe permet une pré-visualisation de la distorsion de la grille par le verre.

## Description des fichiers de sorties pour les grilles déformées

Le programme, pour les distorsions permet d'obtenir d'une part un fichier, visible sur power point, qui permet de visualiser sur un même graphique la grille initiale et la grille déformée par un verre. D'autre part, il est aussi possible d'obtenir deux fichiers textes comportant les coordonnées des nœuds de la grille initiale sur l'un et les coordonnées de la grille déformée sur l'autre. Ce sont ces fichiers textes que nous allons traiter dans ce qui suit afin d'obtenir les valeurs de disparités au travers d'un couple de verre à partir d'une grille initiale.

Les détails des notations pour ces fichiers de sortie vont être maintenant détaillés :

- Fichier de la grille initiale :

- Son nom : resu\_aocalc\_*NomVerre*\_distor\_ini.txt
- Contenu par colonne :
  - point = numéro arbitraire de chaque nœud de la grille, le point 0 étant le nœud en haut à gauche de la grille. La grille est balayée de gauche à droite et de haut en bas.
  - x\_ini = abscisse (en mm) du point de la grille : x = 0 est au centre de la grille, vers la droite les x positifs et vers la gauche les x négatifs.
  - y\_ini = ordonnées (en mm) du point de la grille : y = 0 est au centre de la grille, vers le haut les y positifs et vers le bas les y négatifs.
  - z\_ini = profondeur (en mm) du point de la grille par rapport à la **face arrière du verre : les z sont toujours négatifs** car la grille est devant les yeux (cf. Figure 73).
  - u\_ini = vecteur horizontal (en mm) entre le centre de la grille et le point de la grille (coordonnées en vecteurs).
  - v\_ini = vecteur vertical (en mm) entre le centre de la grille et le point de la grille (coordonnées en vecteurs).

- Fichier de la grille déformée :

- Son nom : resu\_aocalc\_*NomVerre*\_distor\_def.txt
- Contenu par colonne :
  - point = numéro arbitraire de chaque nœud de la grille initiale, permettant la correspondance entre les fichiers def et ini.
  - present = 0 indique que le point n'a pu être calculé dans la grille déformée ; 1 que le point a pu être calculé, il existe donc dans la grille déformée.
  - x\_def = abscisse (en mm) du point de la grille déformée.
  - y\_def = ordonnées (en mm) du point de la grille déformée.
  - z\_def = profondeur (en mm) du point de la grille déformée par rapport à la **face arrière du verre : les z sont toujours négatifs**.

- $u_{ini}$  = vecteur horizontal (en mm) entre le centre de la grille et le point de la grille déformée (coordonnées en vecteurs).
- $v_{ini}$  = vecteur vertical (en mm) entre le centre de la grille et le point de la grille déformée (coordonnées en vecteurs).

### Paramètres d'initialisation du programme de calcul des grilles déformées

Les fichiers pour les yeux droit et gauche doivent être remplis de telle sorte que les deux yeux fixent un même point, qui est le centre de la grille. Ceci dépend donc de l'écart pupillaire. L'œil droit fixera un point à  $-EP/2$  et l'œil gauche à  $+EP/2$ . Le centre de la grille aura également cette position pour une bonne coïncidence entre les grilles droite et gauche. L'implémentation sera la même pour l'œil droit et pour l'œil gauche, il suffit de sélectionner la case correspondant à l'œil voulu (sans oublier de modifier le nom du fichier de sortie entre l'œil droit et l'œil gauche). Les calculs sont faits dans tous les cas pour un œil droit, puis si OG est sélectionné, tout est modifié par symétrie par rapport à l'axe des ordonnées. Ainsi, tout sera notifié dans le programme pour un œil droit, et seul change la sélection et le nom du fichier pour avoir les sorties de l'œil gauche.

*Exemple* : pour un écart pupillaire de 65 mm, une grille, non inclinée, à 650 mm du CRO (donc 625 mm de la face arrière des verres), de 3000 × 3000 mm, avec 91 nœuds.

- Définition de la grille : coordonnées du centre (-32.5 ; 0 ; -625), inclinaison nulle, taille de la grille horizontale / verticale (3000 / 3000), nombre de points horizontaux / verticaux (91 / 91).
- Définition du point de regard : coordonnées (-32.5 ; 0 ; -650).

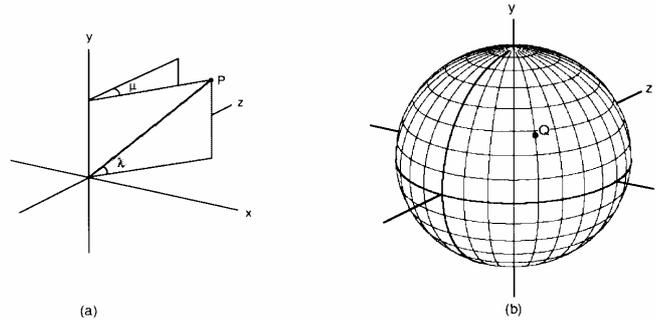
Les noms des fichiers finaux devront absolument être définis pour OD et OG directement dans le programme de la façon suivante : au radical de sortie fichiers on ajoute `_NomVerre_OD` ou `_NomVerre_OG`. On obtiendra ainsi pour l'œil droit : `resu_aocalc_NomVerre_OD_distor_ini.txt` et `resu_aocalc_NomVerre_OD_distor_def.txt` ; et pour l'œil gauche : `resu_aocalc_NomVerre_OG_distor_def.txt`. Ainsi on évitera de supprimer un fichier que l'on vient de créer pour un œil et ces noms faciliteront la recherche de ces fichiers pour le logiciel de calcul des disparités *Dispcalc*.

**Remarque importante** : Dans le programme de calcul des distorsions, les effets prismatiques dus aux verres sont pris en compte dans le calcul des grilles déformées. Il s'agit des effets prismatiques produits par les verres quand on s'éloigne du point de fixation. Ainsi dans la saisie des valeurs des grilles initiales, on ne tiendra pas compte de ces effets et, pour un écart pupillaire de 65 mm, les grilles droite et gauche sont déplacées l'une comme l'autre de 32,5 mm vers, respectivement, la gauche ou la droite.

## Calculs des disparités horizontales et verticales

### Les repères utilisés

L'utilisation des différents repères dépend de la présence de mouvements horizontaux ou verticaux de l'œil. Dans le système visuel humain, il est important que les disparités ne soient pas affectées par les mouvements de vergence et de version horizontale. Le seul repère qui respecte cette condition correspond aux axes longitudinal-azimut / latitudinal-élévation (Figure 10).



**Figure 76 - axes longitudinal-azimut / latitudinal-élévation** (Howard et Rogers, 1995)

- (a) l'azimut est l'angle dièdre  $\mu$  entre le plan vertical passant par le point  $P$  et le plan d'azimut zéro. L'élévation  $\lambda$  est mesurée dans le plan azimutal contenant le point  $P$ .
- (b) représentation des projections des points de même azimut (lignes longitudinales nord-sud) et des projections des points de même élévation (cercles parallèles ou lignes de latitude autour de  $y$ ).

Pour le calcul des disparités nous utiliserons donc ce repère longitudinal-azimut / latitudinal-élévation, ou repère Fick.

### Calcul des disparités horizontales

A partir des fichiers de déformées, nous allons calculées les **disparités horizontales ajoutées**. Les définitions des disparités horizontales et le détail des calculs des différentes disparités se trouvent en Annexe 7.

*Remarque :* La distance de fixation est une notion importante dans le calcul des disparités, il est donc important, pour être rigoureux, de préciser les valeurs utilisées :

- Pour définir les angles de convergence des axes visuels sur le point de fixation, on utilisera la distance entre le plan de fixation (la grille) et le centre de rotation de L'œil (CRO), que l'on nommera  $D_f$ . Les valeurs d'écart pupillaire sont considérées dans le plan du CRO.
- Pour les points disparates (tous les points autres que le point de fixation), la distance du plan de fixation utilisée sera définie comme la distance entre le plan de fixation et le plan des pupilles (dans lequel se trouve le point nodal où se croisent les rayons optiques venant des points disparates). On appellera cette distance  $D$ .

La valeur de la coordonnée  $z$  du point regardé est la distance entre la grille et le CRO (pour l'exemple mentionné précédemment, cette distance  $D_f$  valait 650 mm). La distance

entre le CRO et le plan des pupilles est de 10 mm, ainsi dans l'exemple du paragraphe précédent, D vaudrait 640 mm.

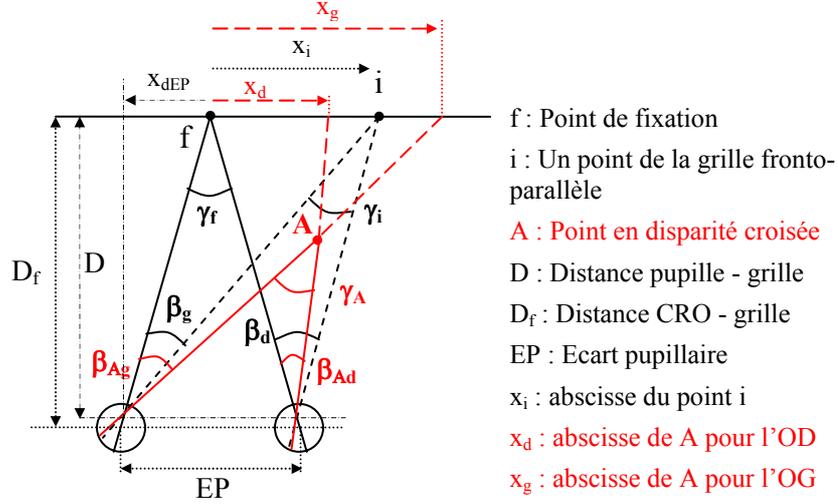


Figure 77 - représentation de la disparité d'un point A, en fonction des abscisses droite et gauche.

Il est important de rappeler que le programme de calcul des distorsions donne le déplacement des points de la grille en distance millimétrique, dans le plan de la grille, et non en valeur angulaire.

La disparité totale ( $\alpha_T$ ) de A est :  $\alpha_T = \beta_{Ag} - \beta_{Ad} = \gamma_A - \gamma_f$

La disparité ajoutée, ou disparité introduite, est la disparité que l'on introduit en plus de la disparité du plan fronto-parallèle, il s'agit donc de la différence entre la disparité totale ( $\alpha_T$ ) du point A par exemple, et la disparité ( $\alpha_p$ ) du plan pour le point correspondant de A, c'est-à-dire ici le point i.

$$\alpha_a = \alpha_T - \alpha_p$$

$$\alpha_a = (\gamma_A - \gamma_f) - (\gamma_i - \gamma_f) = (\beta_{Ag} - \beta_{Ad}) - (\beta_g - \beta_d)$$

$$\alpha_a = \gamma_A - \gamma_i$$

On a alors :

$$\gamma_A = \tan^{-1}\left(\frac{(x_g) + x_{dEP}}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{(x_d) - x_{dEP}}{D}\right)$$

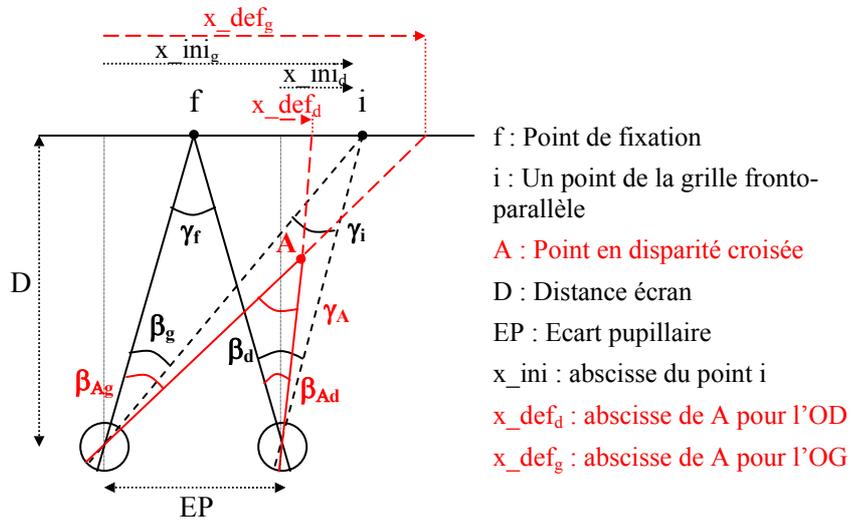
$$\gamma_i = \tan^{-1}\left(\frac{(x_i) + x_{dEP}}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{(x_i) - x_{dEP}}{D}\right)$$

Avec  $\frac{x_{dEP}}{D} = \frac{EP/2}{D_f}$  donc  $x_{dEP} = D \times \frac{EP/2}{D_f}$ ,  $x_{dEP}$  étant le demi-écart pupillaire au niveau du point nodal.

$$\alpha_a = \tan^{-1}\left(\frac{(x_g) + D \times \frac{EP/2}{D_f}}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{(x_d) - D \times \frac{EP/2}{D_f}}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{(x_i) + D \times \frac{EP/2}{D_f}}{D}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{(x_i) - D \times \frac{EP/2}{D_f}}{D}\right)$$

$$\alpha_a = \tan^{-1}\left(\frac{x_g}{D} + \frac{EP/2}{D_f}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x_d}{D} - \frac{EP/2}{D_f}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x_i}{D} + \frac{EP/2}{D_f}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{x_i}{D} - \frac{EP/2}{D_f}\right)$$

*Remarque :* Pour le calcul des grilles déformées, les grilles droite et gauche ont été décalées horizontalement d'un demi-écart pupillaire vers la gauche pour la grille droite et vers la droite pour la grille gauche pour tenir compte de la convergence des deux yeux sur un même point au centre d'une grille, dans le plan médian des deux yeux. Les grilles initiales droite et gauche, en termes de coordonnées des nœuds, ne coïncident pas : les grilles droite et gauche sont placées au même endroit, mais le point de coordonnées (0,0) est le point droit devant l'œil correspondant. Donc, le centre des grilles (entre les deux yeux) a pour coordonnées (-32,5 ; 0) pour la grille droite et (32,5 ; 0) pour la grille gauche. Il nous faut donc reprendre les calculs en tenant compte de cela (cf. Figure 78).



**Figure 78 - représentation de la disparité d'un point A, en fonction des abscisses des cartes de déformées droite et gauche de i produite par un verre hypothétique.**

Il nous faut avoir tous les coordonnées pour une même grille initiale centrée en f, point de fixation placé dans le plan médian de la tête. Pour la grille droite,  $x_i = x\_ini_d + EP/2$  et  $x_d = x\_def_d + EP/2$  ; et pour la grille gauche,  $x_i = x\_ini_g - EP/2$  et  $x_g = x\_def_g - EP/2$ . La formule de calcul de la disparité horizontale ajoutée devient donc, pour notre programme (on considère la grille initiale centrée en (0,0)) :

$$\alpha_a = \tan^{-1}\left(\frac{x\_def_g - EP/2}{D} + \frac{EP/2}{D_f}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x\_def_g + EP/2}{D} - \frac{EP/2}{D_f}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x_i}{D} + \frac{EP/2}{D_f}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{x_i}{D} - \frac{EP/2}{D_f}\right)$$

où  $x\_def_g$  est l'abscisse du point A sur la carte de déformée de l'œil gauche,  $x\_def_d$  l'abscisse du point A sur la carte de déformée de l'œil droite, et  $x_i$  l'abscisse du point A sur la carte initiale recentrée ( $x\_ini_d + EP/2$ ).

Dans le programme, le fichier de la grille initiale est celui de l'œil droit, les coordonnées initiales sont donc calculées à partir de la grille de l'œil droit, donc  $x\_ini_d$ , pour

l'horizontale, à laquelle on ajoute le demi-écart pupillaire, avant tout calcul. Ainsi, les abscisses de la grille initiale sont :  $x_i = x_{ini_d} + EP/2$ .

De plus, les verres étant centrés en vision de loin (à l'infini), pour converger sur un point de fixation situé entre les deux yeux et à une distance finie, les axes visuels vont traverser des zones hors du centre optique des verres. Ainsi les grilles déformées indiqueront que le point de fixation est vu légèrement décalé par les deux yeux, introduisant une disparité horizontale pour ce point de fixation. Or, les yeux vont compenser cette disparité horizontale donc ce décalage horizontal en fusionnant les deux images. La disparité horizontale au point de fixation devant être nulle, il faut soustraire la disparité trouvée pour ce point et la retrancher à toutes les disparités de la grille.

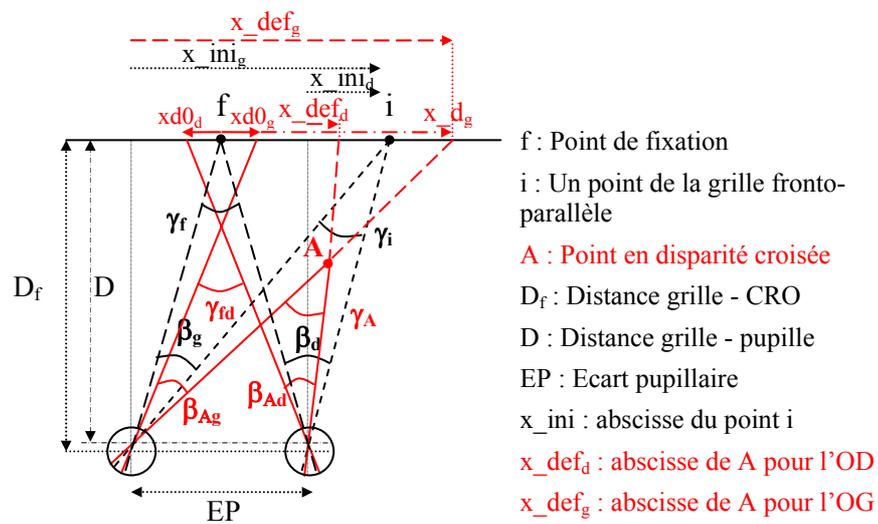


Figure 79 - Représentation de la disparité horizontale d'un point A en tenant compte des décalages des images droite et gauche du point de fixation.

La disparité ajoutée devient donc

$$\alpha_a = (\gamma_A - \gamma_{fd}) - (\gamma_i - \gamma_f)$$

On connaît déjà  $\gamma_i$  et  $\gamma_f$  :

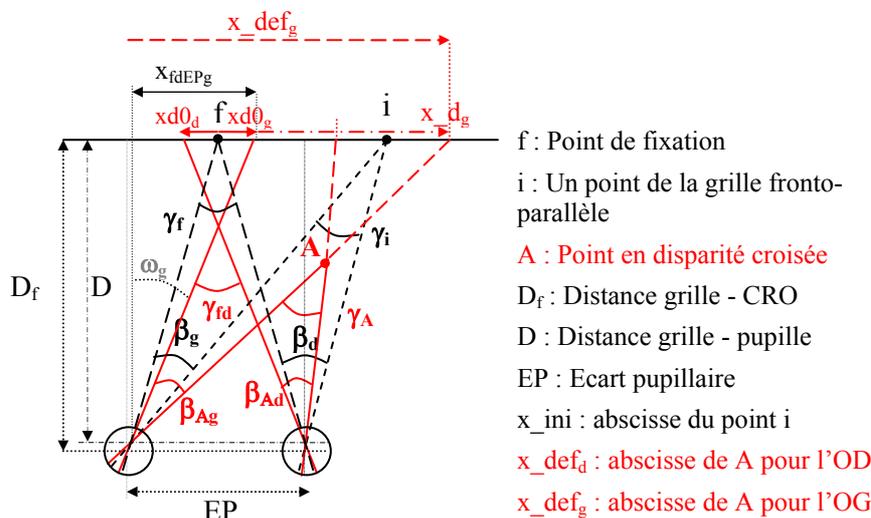
$$\gamma_f = 2 \times \tan^{-1} \left( \frac{EP/2}{D_f} \right)$$

$$\gamma_i = \tan^{-1} \left( \frac{x_i}{D} + \frac{EP/2}{D_f} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{x_i}{D} - \frac{EP/2}{D_f} \right)$$

$$\gamma_{fd} = \tan^{-1} \left( \frac{EP/2 + x_{d0_g}}{D_f} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{EP/2 - x_{d0_d}}{D_f} \right)$$

Pour l'angle  $\gamma_{fd}$ , on utilise la distance  $D_f$  car il s'agit d'un mouvement de vergence des yeux pour fixer les points droit et gauche correspondants au point de fixation. L'œil va donc tourner autour de son CRO.

On considère que les disparités verticales au point de fixation ne vont pas être annulées, contrairement aux disparités horizontales : il n'y aura pas de compensation verticale au point de fixation, la distance  $D_f$  sera donc bien la même pour les angles de convergence des yeux ( $\gamma_{fd}$  et  $\gamma_f$ ).



**Figure 80 - Représentation de la disparité horizontale d'un point A en tenant compte des décalages des images droite et gauche du point de fixation.** La modification de la fixation entraîne un changement des coordonnées  $x_{def}$ .

Les valeurs des coordonnées  $x_{def}$  sont modifiées du fait du déplacement de la fixation pour l'œil droit et l'œil gauche (Figure 80).

$$\gamma_A = \tan^{-1}\left(\frac{x_{-d_g} + x_{fdEPg}}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x_{-d_d} - x_{fdEPd}}{D}\right)$$

$$x_{-d_d} = x_{def_d} - xd0_d + EP/2$$

$$x_{-d_g} = x_{def_g} - xd0_g - EP/2$$

$$\gamma_A = \tan^{-1}\left(\frac{x_{def_g} - xd0_g - EP/2 + x_{fdEPg}}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x_{def_d} - xd0_d + EP/2 - x_{fdEPd}}{D}\right)$$

$$x_{fdEPg} = D \times \tan \omega_g \quad \text{avec } \tan \omega_g = \frac{EP/2 + xd0_g}{D_f}$$

$$x_{fdEPd} = D \times \tan \omega_d \quad \text{avec } \tan \omega_d = \frac{EP/2 - xd0_d}{D_f}$$

Ainsi,

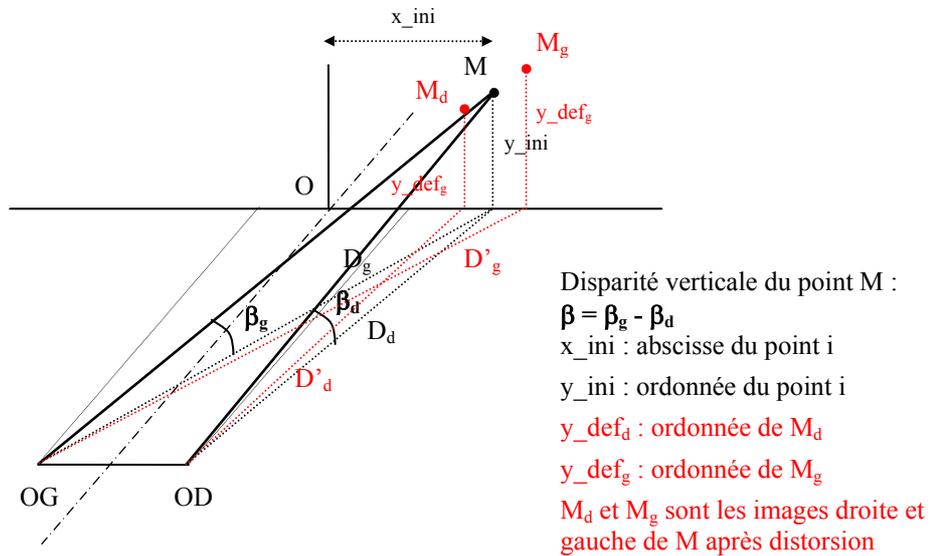
$$\gamma_A = \tan^{-1}\left(\frac{x_{def_g} - xd0_g - EP/2}{D} + \frac{EP/2 + xd0_g}{D_f}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x_{def_d} - xd0_d + EP/2}{D} - \frac{EP/2 - xd0_d}{D_f}\right)$$

La formule de la disparité ajoutée devient :

$$\alpha_a = \tan^{-1}\left(\frac{x_{def_g} - xd0_g - EP/2}{D} + \frac{EP/2 + xd0_g}{D_f}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x_{def_d} - xd0_d + EP/2}{D} - \frac{EP/2 - xd0_d}{D_f}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{EP/2 + xd0_g}{D_f}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{EP/2 - xd0_d}{D_f}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x_i}{D} + \frac{EP/2}{D_f}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{x_i}{D} - \frac{EP/2}{D_f}\right) + 2 \times \tan^{-1}\left(\frac{EP/2}{D_f}\right)$$

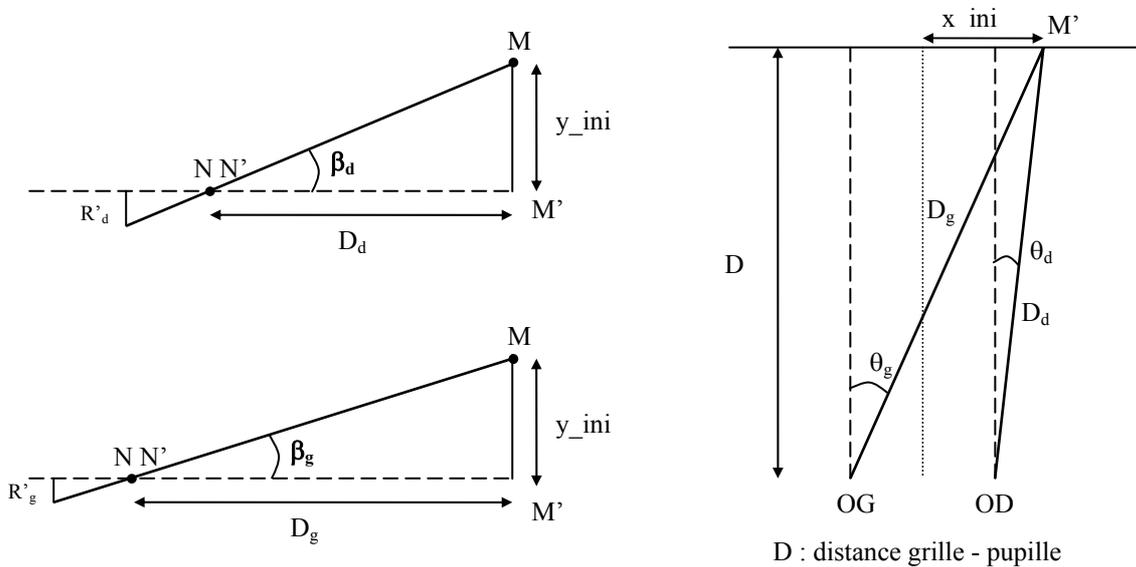
**Calculs des disparités verticales**

Egalement nous allons calculer les *disparités verticales ajoutées* (Figure 81). De même, les définitions des disparités verticales et le détail des calculs se trouvent en Annexe 7.



**Figure 81 - Représentation d'un point M de la grille initiale et de ses images pour l'œil droit et pour l'œil gauche au travers d'un verre hypothétique, les points  $M_d$  et  $M_g$ .** Les points O, OD et OG sont dans le plan même plan horizontal. Le point O est dans le plan fronto-parallèle contenant le point M.

Les disparités verticales sont calculées dans le système de coordonnées : azimuth-longitudinal / élévation-latitudinal.



**Figure 82 - Représentation des paramètres nécessaires pour le calcul de la disparité verticale d'un point M de la grille.** Les angles d'élévation  $\beta_d$  et  $\beta_g$  dans les plans verticaux passant par les axes de visée du point M par les deux yeux (à droite). Le plan horizontal passant par les deux yeux (à gauche).

Notons que, dans les Figure 81 et Figure 82, l'œil droit est plus proche du point M que l'œil gauche, et donc  $D_g$  est supérieure à  $D_d$ , et donc  $\beta_d$  est supérieur à  $\beta_g$ . Les distances  $D_g$  et  $D_d$  sont les distances entre la grille et le plan des pupilles.

La disparité verticale d'un point M de la grille fronto-parallèle est égale à :

$$\beta_p = \beta_g - \beta_d$$

On a d'abord :

$$\tan \beta_g = \frac{y_{ini}}{D_g} \quad \text{et} \quad \tan \beta_d = \frac{y_{ini}}{D_d}$$

en utilisant la formule de Pythagore,

$$D_g^2 = D^2 + ((x_{ini}) + x_{dEP})^2$$

$$D_d^2 = D^2 + ((x_{ini}) - x_{dEP})^2$$

Comme nous l'avons dans la partie sur les disparités horizontales,  $x_{dEP}$  est le demi-écart pupillaire au niveau du point nodal.

$$x_{dEP} = D \times \frac{EP/2}{D_f}$$

Enfin, la disparité verticale du point M va donner :

$$\beta_p = \tan^{-1}\left(\frac{y_{ini}}{D_g}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{y_{ini}}{D_d}\right)$$

$$\beta_p = \tan^{-1}\left(\frac{y_{ini}}{\sqrt{D^2 + \left((x_{ini}) + D \times \frac{EP/2}{D_f}\right)^2}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{y_{ini}}{\sqrt{D^2 + \left((x_{ini}) - D \times \frac{EP/2}{D_f}\right)^2}}\right)$$

### La disparité verticale ajoutée

Il s'agit de la disparité verticale que l'on va introduire en plus de celle du plan de l'écran (plan fronto-parallèle).

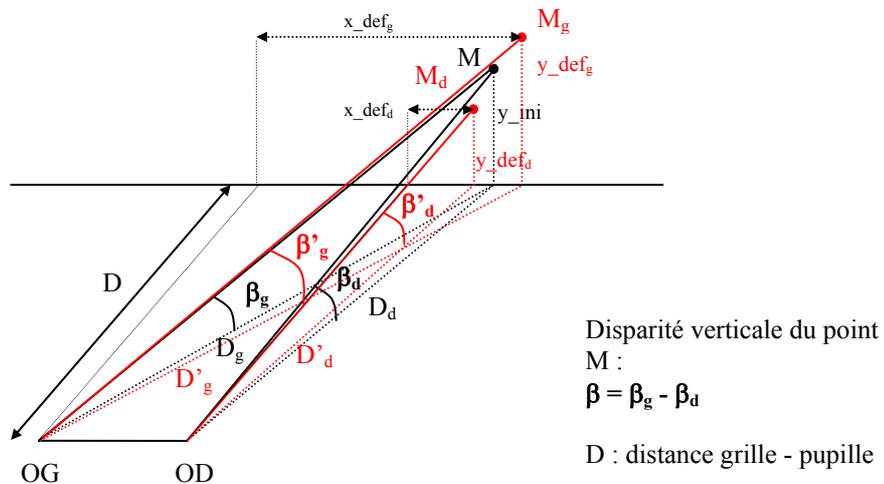


Figure 83 - Représentation des angles, initiaux et après déformation de la grille initiale, pour le calcul des disparités verticales. Les points M, M<sub>g</sub> et M<sub>d</sub> sont dans un même plan.

La disparité totale pour les distorsions droite et gauche (droites rouges) du point M est de :

$$\tan \beta'_g = \frac{y\_def_g}{D'_g} \quad \text{et} \quad \tan \beta'_d = \frac{y\_def_d}{D'_d}$$

en utilisant la formule de Pythagore et en tenant compte directement du décalage des grilles de déformées droite et gauche,

$$D'_g{}^2 = D^2 + (x\_def_g)^2$$

$$D'_d{}^2 = D^2 + (x\_def_d)^2$$

Enfin, la disparité totale est donc :

$$\beta_T = \tan^{-1}\left(\frac{y\_def_g}{D'_g}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{y\_def_d}{D'_d}\right)$$

$$\beta_T = \tan^{-1}\left(\frac{y\_def_g}{\sqrt{D^2 + (x\_def_g)^2}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{y\_def_d}{\sqrt{D^2 + (x\_def_d)^2}}\right)$$

Et ainsi on peut calculer la disparité verticale ajoutée :

$$\beta_a = \beta_T - \beta_p$$

$$\text{ou bien } \beta_a = \beta'_g - \beta'_d - (\beta_g - \beta_d)$$

Pour la disparité verticale, il faut également prendre en compte le décalage horizontal des images droite et gauche au point de fixation (Figure 84). Le décalage vertical qui pourrait exister au point de fixation ne va pas être annulé, comme c'est le cas pour une disparité verticale non nulle au point de fixation.

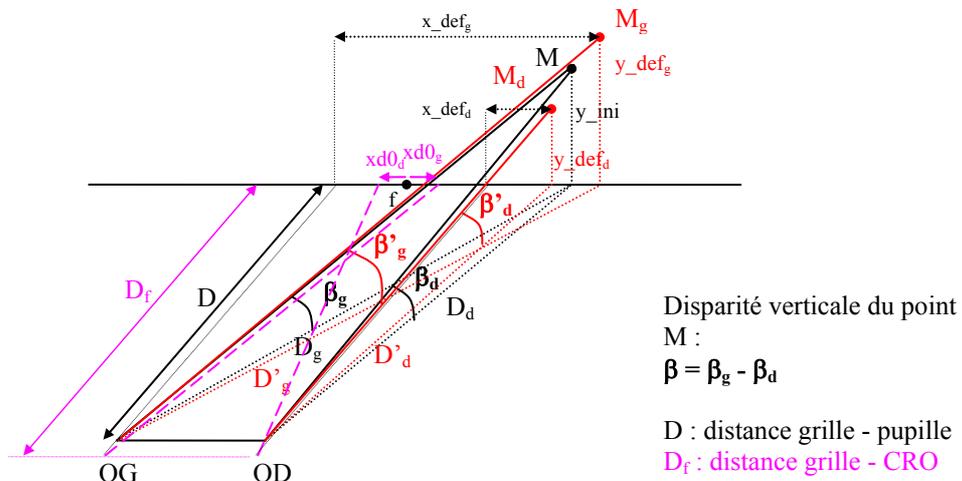


Figure 84 - modifications, sur la grille déformée de l'œil droit, produites par le décalage de l'image droite du point de fixation dont la disparité doit être nulle.

Seul le calcul de  $D'_d$  et  $D'_g$  va être modifié par la modification de convergence des deux yeux.

$$D'^2_d = D^2 + (x_{-d} - x_{fdEPd})^2$$

pour les détails des calculs de  $x_{-d}$  et  $x_{fdEPd}$  se reporter à l'Annexe 7.

$$D'^2_d = D^2 + \left[ x_{-def_d} - xd0_d + EP/2 - \left( D \times \frac{EP/2 - xd0_d}{D_f} \right) \right]^2$$

$$D'^2_g = D^2 + \left[ x_{-def_g} - xd0_g - EP/2 + \left( D \times \frac{EP/2 + xd0_g}{D_f} \right) \right]^2$$

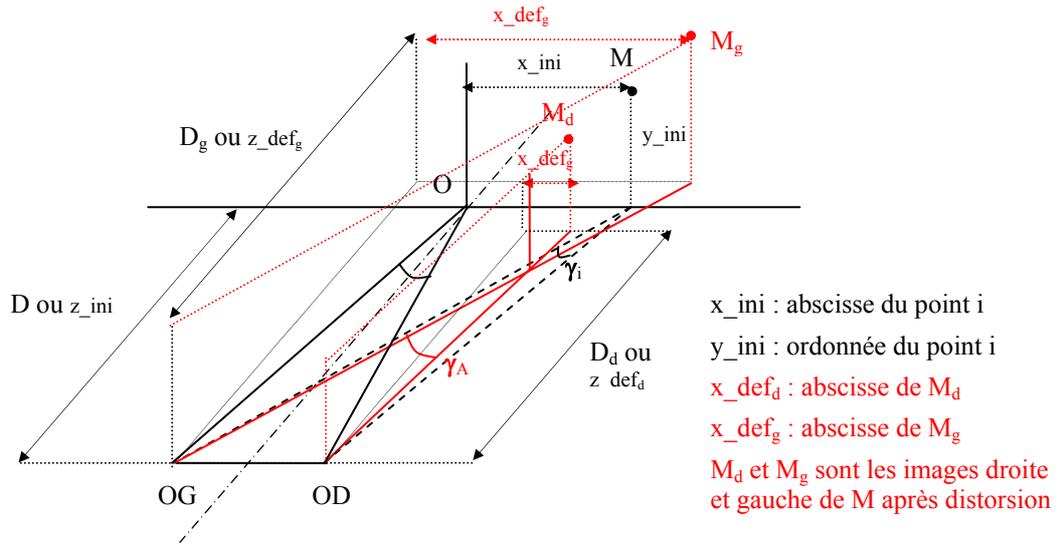
$$\beta_T = \tan^{-1} \left( \frac{y_{-def_g}}{\sqrt{D^2 + \left[ x_{-def_g} - xd0_g - EP/2 + \left( D \times \frac{EP/2 + xd0_g}{D_f} \right) \right]^2}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{y_{-def_d}}{\sqrt{D^2 + \left[ x_{-def_d} - xd0_d + EP/2 - \left( D \times \frac{EP/2 - xd0_d}{D_f} \right) \right]^2}} \right)$$

### Généralisation pour un point quelconque en dehors des méridiens

#### Disparités horizontales

Le calcul des disparités horizontales hors des méridiens reste globalement le même car on utilise la projection dans le plan horizontal passant par les deux yeux.

Par contre, il peut être intéressant de considérer un point de la grille initiale, en dehors des méridiens horizontal et vertical, dont les coordonnées sur les grilles déformées seraient décalées horizontalement, verticalement mais également selon l'axe de profondeur (z) (cf. Figure 85). Ce cas se produit quand on utilise une grille initiale inclinée.



**Figure 85 - Représentation des angles, initiaux et après déformation de la grille initiale, pour le calcul des disparités horizontales d'une grille initialement inclinée.** Les points  $M$ ,  $M_g$  et  $M_d$  ne sont donc pas dans les mêmes plans.

Il faudra donc prendre en compte la profondeur ( $z$ ), ou distance, de chaque point selon l'œil auquel il correspond. La formule permettant de calculer les disparités horizontales devient donc :

$$\alpha_a = \tan^{-1}\left(\frac{(x_g) + EP/2}{D_g}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{(x_d) - EP/2}{D_d}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{(x_i) + EP/2}{D}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{(x_i) - EP/2}{D}\right)$$

ou bien

$$\alpha_a = \tan^{-1}\left(\frac{x\_def_g - xd0_g - EP/2}{D_g} + \frac{EP/2 + xd0_g}{D_f}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x\_def_d - xd0_d + EP/2}{D_d} - \frac{EP/2 - xd0_d}{D_f}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{EP/2 + xd0_g}{D_f}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{EP/2 - xd0_d}{D_f}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x_i + EP/2}{D}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{x_i - EP/2}{D}\right) + 2 \times \tan^{-1}\left(\frac{EP/2}{D_f}\right)$$

où  $D_g$  correspond à la distance entre le plan frontal contenant le point de la grille gauche et le plan des pupilles ( $z\_def_g + 15$ ), de même pour  $D_d$  entre le point de la grille gauche et les pupilles ( $z\_def_d + 15$ ).

$D$  est la distance entre le plan des pupilles et la grille initiale ( $z\_ini + 15$ ) et  $D_f$  la distance entre le CRO et le plan du point de fixation sur la grille initiale ( $z\_ini_0 + 25$ ).

*Remarque* : sachant qu'il ne faut pas oublier que les  $z\_def$  et  $z\_ini$  sont calculées par rapport à la face arrière du verre, alors que pour le calcul des disparités les distances sont en fonction du plan des pupilles, il faudra donc ajouter 15 mm aux  $z$  des fichiers (face arrière des verres - pupilles = 15 mm) ou 25 mm (face arrière des verres - CRO = 25 mm).

Disparités verticales

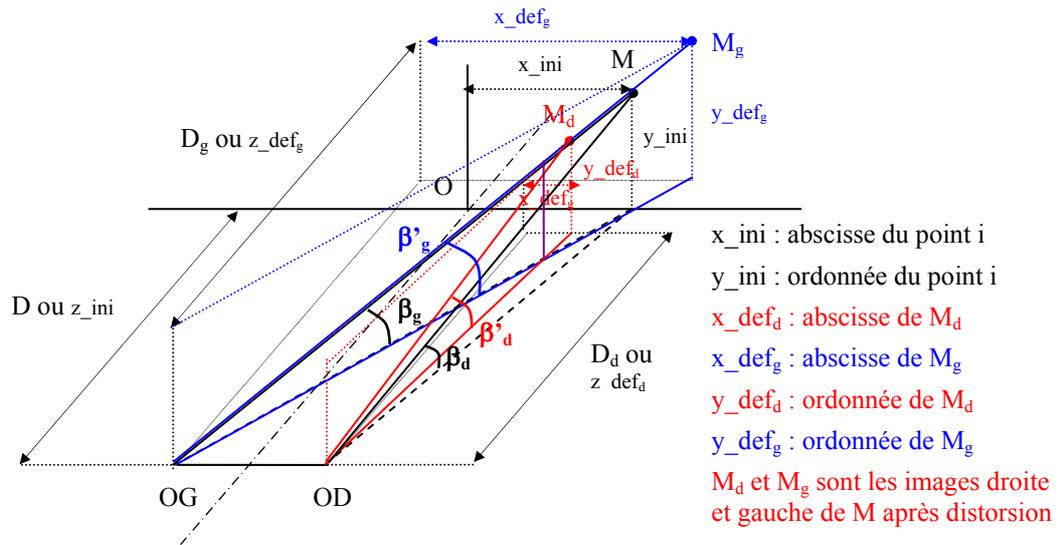


Figure 86 - Représentation des angles, initiaux ( $\beta_g, \beta_d$ ) et après déformation ( $\beta'_g, \beta'_d$ ) de la grille initiale, pour le calcul des disparités verticales d'une grille initialement inclinée. Les points M,  $M_g$  et  $M_d$  ne sont donc pas dans les mêmes plans.

A nouveau, il faudra prendre en compte la profondeur ( $z$ ), ou distance, de chaque point selon l'œil auquel il correspond. Les formules permettant de calculer les disparités verticales deviennent donc :

La disparité verticale du point M de la grille initiale reste la même :

$$\beta_p = \tan^{-1} \left( \frac{y\_ini}{\sqrt{D^2 + \left( (x\_ini) + D \times \frac{EP}{2} \right)^2}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{y\_ini}{\sqrt{D^2 + \left( (x\_ini) - D' \times \frac{EP}{2} \right)^2}} \right)$$

Avec, comme pour les disparités horizontales,  $D = z\_ini + 15$  et  $D_f = z\_ini_0 + 25$ . Mais également,  $D' = z\_ini_0 + 15$ , car  $D'$  est la distance entre le plan du point de fixation et le plan des pupilles.

Et la disparité totale obtenue par les grilles déformées droite et gauche devient :

$$\beta_r = \tan^{-1} \left( \frac{y\_def_g}{\sqrt{D_g^2 + \left[ x\_def_g - xd0_g - EP/2 + \left( D \times \frac{EP/2 + xd0_g}{D_f} \right) \right]^2}} \right)$$

$$- \tan^{-1} \left( \frac{y\_def_d}{\sqrt{D_d^2 + \left[ x\_def_d - xd0_d + EP/2 - \left( D \times \frac{EP/2 - xd0_d}{D_f} \right) \right]^2}} \right)$$

où  $D_g$  correspond à la distance entre le plan frontal contenant le point de la grille gauche et le plan des pupilles ( $z\_def_g + 15$ ), de même pour  $D_d$  entre le point de la grille gauche et les pupilles ( $z\_def_d + 15$ ).

### ***Le programme Dispcalc***

#### **Présentation**

Le programme ***Dispcalc*** nécessite d'une part les fichiers définissant les grilles déformées de l'œil droit et de l'œil gauche et d'autre part le fichier correspondant à la grille initiale. La grille initiale est celle de l'œil droit que l'on recentre entre les deux yeux (les coordonnées de chaque point vont être additionnées d'un demi-écart pupillaire). Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, le calcul des disparités horizontales et verticales prend en compte le décalage des grilles déformées de chaque œil.

Les fichiers de sorties du programme vont être d'une part :

- Un fichier .xls des disparités pour chaque point de la grille centrée
  - o Son nom : resu\_dispcalc\_NomVerre\_disp.xls
  - o Contenu par colonne :
    - point = numéro de chaque nœud de la grille correspondant à ceux des fichiers des déformées et de la grille initiale, le point 0 étant le nœud en haut à gauche de la grille. La grille est balayée de gauche à droite et de haut en bas.
    - present = 0 indique que la disparité pour ce point n'a pu être calculée (absence sur l'un des deux fichiers droit ou gauche) ; 1 que la disparité de ce point a pu être calculée.
    - x\_ini = abscisse (en mm) du point de la grille :  $x = 0$  est au centre de la grille, vers la droite les  $x$  positifs et vers la gauche les  $x$  négatifs.

- $y_{ini}$  = ordonnées (en mm) du point de la grille :  $y = 0$  est au centre de la grille, vers le haut les  $y$  positifs et vers le bas les  $y$  négatifs.
  - $z_{ini}$  = profondeur (en mm) du point de la grille par rapport à la face arrière du verre : **les  $z$  sont toujours négatifs** car la grille est devant les yeux (cf. figure 1).
  - $dispH$  = disparité horizontale (en minute d'arc) du point considéré.
  - $dispV$  = disparité verticale (en minute d'arc) du point considéré.
- Deux fichiers .txt permettant les sorties graphiques d'iso-disparité horizontale ou verticale
- Leur nom : `resu_dispcalc_NomVerre_dispH.txt`  
et `resu_dispcalc_NomVerre_dispV.txt`
  - Contenu par colonne :
    - Coordonnée bêta (en degrés), l'angle bêta sera défini par la suite.
    - Coordonnée alpha (en degrés), l'angle alpha sera défini par la suite.
    - Valeur de la disparité horizontale, respectivement verticale, pour le point considéré.

### Calculs supplémentaires

Le calcul seul des disparités binoculaires, horizontales et verticales, pour un couple de verres ophtalmiques et pour chaque point de l'espace ne va pas être suffisant pour l'analyse d'un ou plusieurs couples de verres. Des calculs supplémentaires vont pouvoir apporter des informations supplémentaires. Ces calculs sont les suivants :

- **La valeur et le lieu des disparités maximales.** Pour les disparités horizontales comme pour les disparités verticales, on cherchera les valeurs maximales positives et négatives, ainsi que leurs coordonnées.
- **Les gradients de disparités.** Pour les disparités horizontales, on calculera les gradients de disparité en chacun des points par rapport aux points voisins. Le nombre de points du voisinage utilisé pour calculer le gradient dépend de la zone de champ visuel considéré : A proximité du point de fixation, sont utilisés les huit points autour de chaque point, et en périphérie, plus de huit points sont utilisés. Le nombre de points utilisés est défini par un filtre dont la largeur est fixée par la distance entre les points au centre ( $3^\circ$  pour une grille de  $91 \times 91$  points à 650 mm). Le filtre utilisé est gaussien, et attribue ainsi un poids pour chaque point selon sa distance par rapport au point considéré, d'après la gaussienne. Pour les disparités horizontales et verticales, il est possible de visualiser les cartes d'iso-gradients de disparité.

Ces informations sont indiquées en bas à gauche des cartes d'iso-disparités que nous allons décrire ci-après, pour les valeurs maximales.

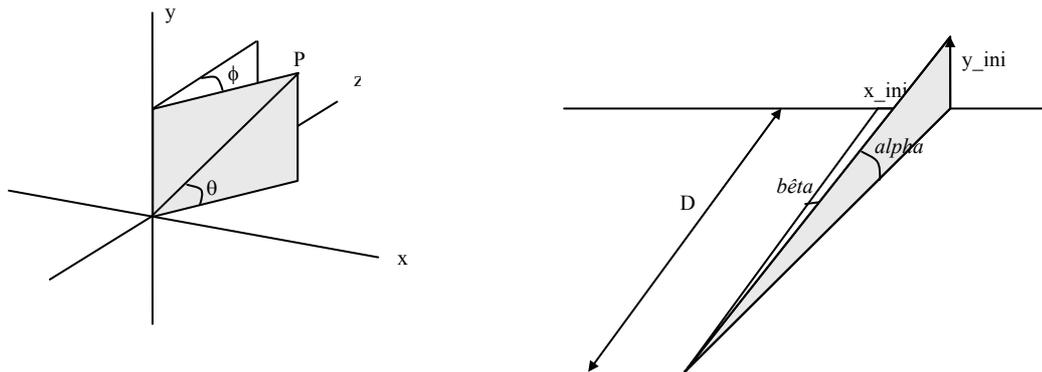
## Représentation graphique des disparités binoculaires

### Cartes d'iso-disparités

#### Coordonnées alpha / bêta et repères

Pour obtenir des cartes d'iso-disparité, d'une part pour les disparités horizontales et d'autre part pour les disparités verticales, notre programme **Dispcalc** va devoir créer deux fichiers textes : chacun indiquant les coordonnées des points initiaux de la grille en alpha, bêta, c'est-à-dire en angulaire centré sur le centre des deux yeux, alpha étant l'angle d'élévation (négatif vers le haut) et bêta étant l'angle d'azimut. Ce système de coordonnées est le système de Fick qui est semblable au repère monoculaire azimut-longitudinale et élévation-latitudinale, avec l'azimut par rapport au plan sagittal de la tête (Figure 87). Le système de coordonnées que nous utilisons pour les disparités binoculaires est également le repère azimut-longitudinale / élévation-latitudinale.

Calcul de alpha et bêta à partir des coordonnées  $x\_ini$  et  $y\_ini$  des points de la grille initiale, placée à une distance  $D$  de l'observateur :



**Figure 87 - Représentation des angles de longitude  $\phi$  et de latitude  $\theta$  définissant le système de coordonnées Fick (azimut-longitudinale / élévation-latitudinale), à gauche. A partir du repère Fick, représentation de la définition des angles  $\alpha$  et  $\beta$ , à droite.**

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{x\_ini}{D}\right)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{y\_ini \times \cos(\beta)}{D}\right)$$

La distance utilisée dans ce calcul est la distance grille - points nodaux, ou grille - pupilles.

Notons que pour la représentation habituelle des sorties optiques et autres sorties décrivant les verres ophtalmiques, les repères sont négatifs vers la gauche et négatif vers le haut. Les coordonnées des points de la grille, que nous utilisons pour le calcul des disparités,

sont négatives vers le bas. Il nous faudra donc ajouter un signe moins à la valeur initiale d' $\alpha$  :

$$\alpha = -\tan^{-1}\left(\frac{y_{ini} \times \cos(\beta)}{D}\right)$$

### Régularité des cartes iso

D'autre part, pour obtenir des cartes iso régulières, il faut des valeurs tous les  $2^\circ$ . Donc la grille d'origine devrait idéalement avoir des nœuds tous les  $2^\circ$ . Or, si l'on considère une grille de  $3000 \times 3000$  mm, les données de la grille étant en grandeur millimétrique, un angle de  $2^\circ$  ne va pas avoir la même dimension millimétrique au centre qu'en périphérie.

Par exemple, si l'on souhaite avoir  $2^\circ$  autour du point central, pour une grille à 650 mm :

$$pas_{mm} = DistGrille \times \tan(pas^\circ) = 650 \times \tan(2^\circ) \approx 22,7 \text{ mm}$$

et pour un point situé à 1000 mm du point de fixation :

$$pas_{mm} = 1000 - \left( DistGrille \times \tan\left(a \tan\left(\frac{1000}{DistGrille}\right) - 2\right) \right) \approx 72,5 \text{ mm}$$

La différence étant importante, si l'on veut être sûr d'avoir un écart de  $2^\circ$  au centre il faudra considérer ce pas millimétrique central, ainsi le nombre de points de la grille sera le suivant :

$$NbPas = \frac{TailleGrille}{pas_{mm}} = \frac{3000}{22,7} \approx 132$$

Le nombre de nœuds de la grille sera de  $133 \times 133$  (à indiquer dans les « Paramètres d'initialisation »).

Cette grille convertie en coordonnées angulaires  $\beta$  et  $\alpha$  va être irrégulière, avec des nœuds tous les  $2^\circ$  environ au centre et plus que tous les  $2^\circ$  en s'éloignant du centre.

### Fichiers de sortie graphique

L'affichage des cartes d'iso-disparités horizontale et verticale va se faire grâce à un programme de visualisation *GView*, programme interne utilisé par les logiciels d'analyse surfacique ou optique des verres ophtalmiques chez Essilor.

Ainsi on va obtenir deux fichiers de format .cgm, dont les noms sont : *resu\_dispcalc\_NomVerre\_Disph\_GView.cgm* et *resu\_dispcalc\_NomVerre\_Dispv\_GView.cgm*, pour les cartes d'iso-disparités respectivement horizontales et verticales. Ces deux fichiers pourront ensuite être ouverts sous Power Point grâce au programme *RecupCGM*, permettant une visualisation par diapositives et l'impression des cartes obtenues.

*Carte de vecteurs*

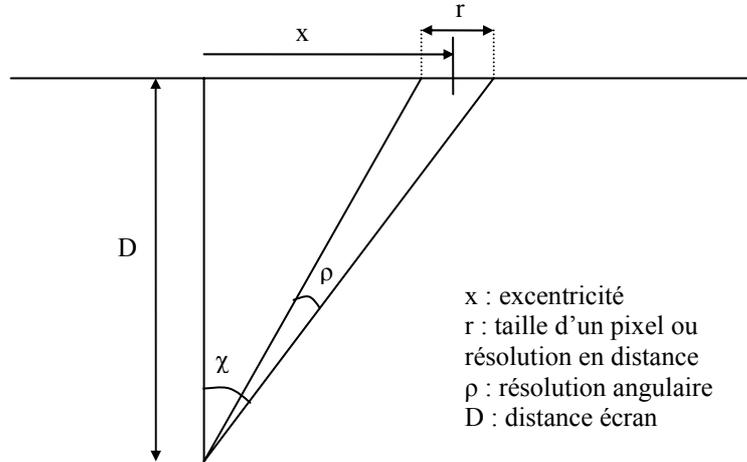
La représentation sous forme de vecteurs de composition de la disparité horizontale et de la disparité verticale pour chaque point de la grille permet une visualisation rapide de la répartition des disparités et leurs composantes principales (horizontale ou verticale).

Comme pour la représentation des cartes d'iso-disparités, il est nécessaire d'avoir une grille de points réguliers. Pour le cas des vecteurs, un pas de 6° est suffisant.

Des fichiers contenant les coordonnées de chaque vecteur sont créés (un fichier par vecteur nommé : fichier\_nb.2D, *nb* étant un nombre implémenté au fur et à mesure pour chaque vecteur défini). Ensuite, grâce au programme GView, on obtient des fichiers .cgm contenant chacun 30 vecteurs (leur nom : Vecteur\_GView\_nb.cgm, *nb* étant un nombre de 0 à 10, nombre implémenté automatiquement par une boucle). Ces derniers fichiers seront ouverts par le programme *RECUP2* (variante de *RecupCGM* pour afficher tous les .cgm sur une même diapositive) de Power point, permettant ainsi d'obtenir une carte des vecteurs représentant la combinaison des disparités horizontale et verticale pour chaque point de l'espace.

**Annexe 4 - calcul de la résolution angulaire en fonction de l'excentricité et courbe représentative de la variation de la résolution angulaire en fonction de l'excentricité.**

Calcul de la résolution angulaire horizontale sur l'axe horizontal de l'écran :



La taille d'un pixel ou résolution en distance vaut :

$$r = \frac{\text{TailleEcran}}{\text{NombreDePixel}}$$

en horizontal, la résolution en mm est de  $r = \frac{1290}{1600} = 0,806$  mm.

On a :

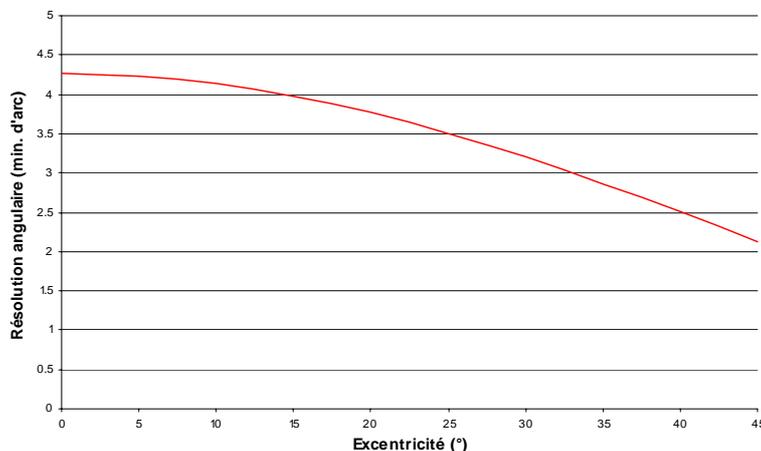
$$\chi = \tan^{-1}\left(\frac{x+r/2}{D}\right)$$

et donc,

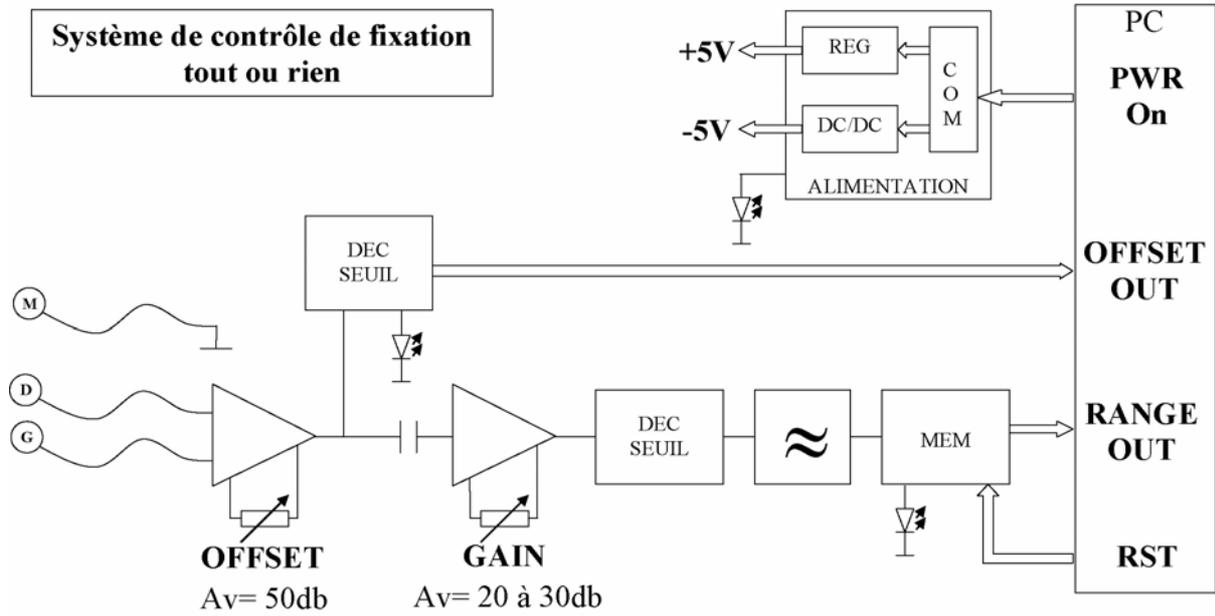
$$\rho = \tan^{-1}\left(\frac{x+r/2}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x-r/2}{D}\right)$$

ou bien  $\rho = \tan^{-1}\left(\tan(exc) + \frac{r/2}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\tan(exc) - \frac{r/2}{D}\right)$  où *exc* est l'excentricité en degrés.

La représentation de la résolution angulaire en minutes d'arc en fonction de l'excentricité donne la courbe suivante :



**Annexe 5 - Schéma électronique simplifié représentant le système de contrôle de la fixation par électro-oculographie.**



## **Annexe 6 - phraséologie pour l'expérience « seuils de détection de déformation d'une surface plane ».**

Vous allez effectuer plusieurs séries de mesure de seuils, avec un contrôle de la fixation par électro-oculographie (EOG). L'expérience dure environ 30 minutes et va se dérouler de la manière suivante :

Après la calibration de l'EOG, vous cliquerez sur le bouton GO pour lancer l'expérience dès que vous vous sentez prêt.

Chaque série de mesure va consister en 3 étapes :

### **1. La préfixation :**

La mesure débute par une image noire avec juste un disque blanc au centre. Ce disque blanc est le point de fixation que vous devez fixer pendant la mesure. L'image noire est présentée pendant 4 secondes, à la fin desquelles vous devez absolument fixer le disque blanc au centre.

### **2. La mesure en elle-même :**

Ensuite commence la mesure, apparaît donc une image de ciel étoilé.

**Important :** je vous rappelle que pendant toute la durée de la mesure, vous devez fixer le point de fixation (le disque blanc avec un point noir au centre), et faire maintenir le point noir simple et net. Un contrôle de cette fixation est effectué par l'EOG. La détection d'un mouvement oculaire par l'EOG entraîne l'arrêt de la mesure en cours, identifié par un son et par l'affichage de l'écran de choix (décrit ci-dessous), auquel vous répondrez au hasard.

En maintenant bien la fixation sur le point blanc, votre tâche sera d'indiquer par un clic gauche de la souris quand vous percevez une déformation concave ou convexe du plan de l'écran, à partir de la moyenne périphérie. Un bip sonore vous confirmera que vous avez cliqué.

**Remarque importante :** la première image peut déjà vous sembler concave ou convexe. Vous ne devez pas en tenir compte dans votre jugement, et attendre quelques secondes avant de décider de cliquer.

### **3. Le choix :**

Après votre clic de souris, apparaît un écran de choix, avec deux possibilités, représentées par deux formes 3D, concave et convexe : vous indiquerez, en cliquant sur le bouton correspondant, si la déformation que vous venez de percevoir était plutôt concave ou plutôt convexe (même si votre perception ne correspond pas exactement aux schémas).

Dès que vous avez cliqué sur l'un des deux choix la série suivante commence directement.

**Remarque :** Si vous ressentez le besoin de faire une pause, vous avez la possibilité d'attendre le temps que vous souhaitez avant de cliquer sur le bouton de votre choix.

Avez-vous bien tout compris ? Avez-vous des questions ?

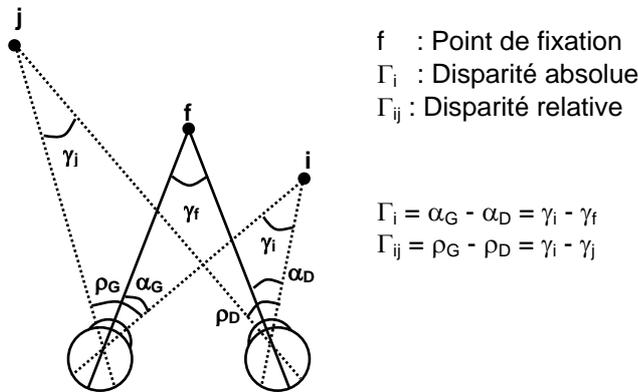
**Annexe 7 - calculs sur les disparités binoculaires, horizontales et verticales.**

*Calculs sur les disparités horizontales*

**Définitions**

*Rappel disparité absolue / disparité relative*

La Figure 88 représente la différence entre la disparité relative et la disparité absolue, et leur calcul respectif. Rappelons que la *disparité absolue* est la disparité d'un point (i ou j sur la figure) par rapport au point de fixation (f), et la *disparité relative* est la disparité entre deux points (i et j) autres que le point de fixation.

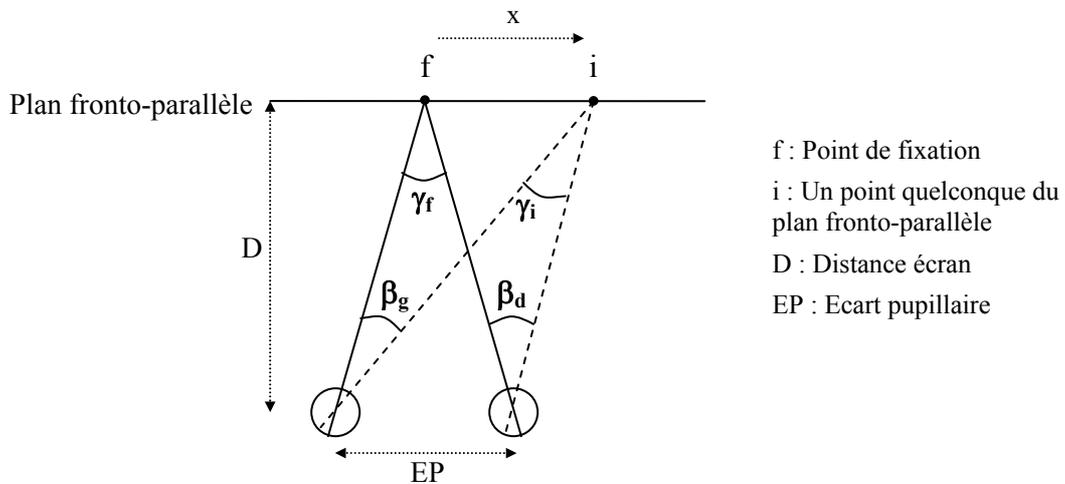


**Figure 88 - Calcul de la disparité absolue et de la disparité relative**

Par la suite, nous ne nous intéresserons uniquement aux *disparités absolues*, la disparité sera donc considérée pour chaque point en fonction du point de fixation.

*Disparité totale / disparité ajoutée*

*Disparité du plan fronto-parallèle*



**Figure 89 - Représentation de la disparité absolue du plan fronto-parallèle**

La disparité absolue du plan fronto-parallèle ( $\alpha_p$ ) se calcule comme suit :  $\alpha_p = \beta_g - \beta_d = \gamma_i - \gamma_f$

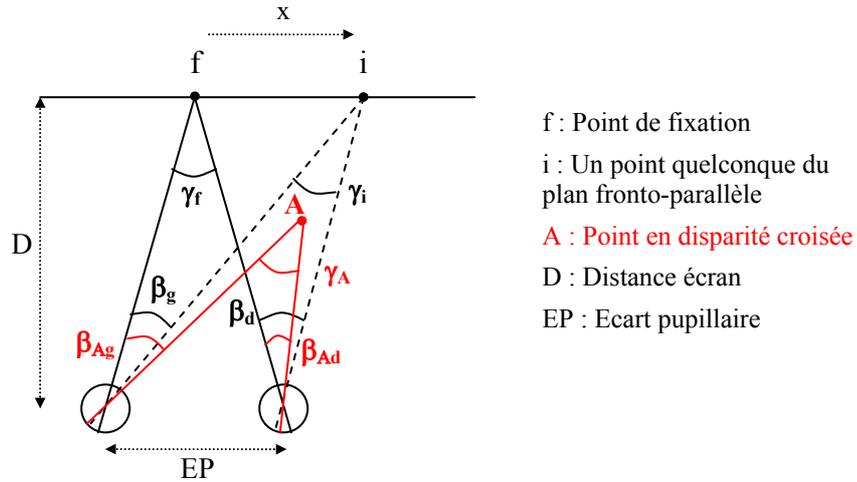
Disparité totale

Figure 90 - représentation de la disparité absolue d'un point A

La disparité totale ( $\alpha_T$ ) du point A est :

$$\alpha_T = \beta_{Ag} - \beta_{Ad} = \gamma_A - \gamma_f$$

Disparité ajoutée

La disparité ajoutée, ou disparité introduite, est la disparité que l'on introduit en plus de la disparité du plan fronto-parallèle, il s'agit donc de la différence entre la disparité totale ( $\alpha_T$ ) du point A par exemple (Figure 78), et de la disparité ( $\alpha_p$ ) du plan pour le point i (Figure 89), point correspondant de A.

$$\alpha_a = \alpha_T - \alpha_p$$

$$\alpha_a = (\gamma_A - \gamma_f) - (\gamma_i - \gamma_f) = (\beta_{Ag} - \beta_{Ad}) - (\beta_g - \beta_d)$$

$$\alpha_a = \gamma_A - \gamma_i$$

Si on introduit de la *disparité croisée*, alors  $\alpha_a$  sera *positif* (car  $\gamma_A > \gamma_i$ ) et inversement, si on introduit de la *disparité homonyme*, alors  $\alpha_a$  sera *négatif* (car  $\gamma_A < \gamma_i$ ).

**Calcul des images pour une disparité introduite***Disparité du plan de l'écran*

Le plan de l'écran étant un plan fronto-parallèle à une distance D, de l'observateur, choisie (Figure 89), on peut calculer plus précisément la disparité de ce plan en tout point (i) d'excentricité x par rapport au point de fixation (f).

$$\alpha_p = \beta_g - \beta_d$$

$$\alpha_p = \tan^{-1}\left(\frac{x + (EP/2)}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{EP/2}{D}\right) - \left[ \tan^{-1}\left(\frac{x - (EP/2)}{D}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{EP/2}{D}\right) \right]$$

$$\alpha_p = \tan^{-1}\left(\frac{x + (EP/2)}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{EP/2}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x - (EP/2)}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{EP/2}{D}\right)$$

$$\alpha_p = \tan^{-1}\left(\frac{x + (EP/2)}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x - (EP/2)}{D}\right) - 2 \tan^{-1}\left(\frac{EP/2}{D}\right)$$

### Disparité totale d'un point A

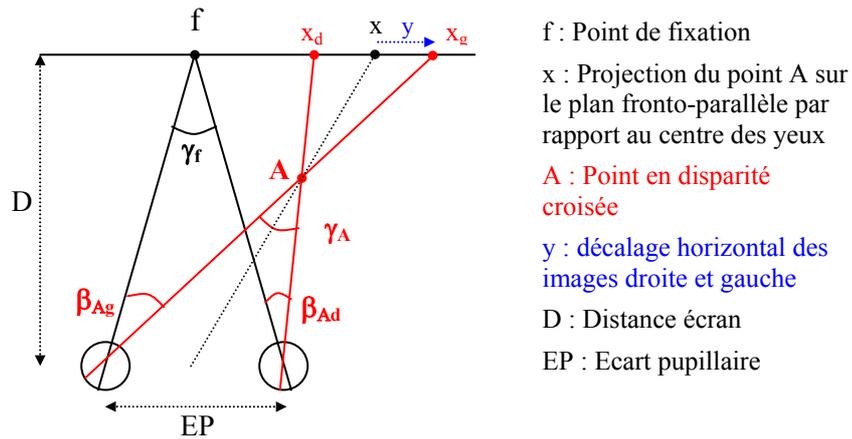


Figure 91 - Représentation de la disparité d'un point A en terme de décalage d'images fronto-parallèles

Notons que x est l'excentricité du point A pour le couple oculaire, ou la projection sur le plan fronto-parallèle de A par rapport au centre du couple oculaire,  $x_d$  et  $x_g$  sont les projections du point A pour les yeux droit et gauche respectivement, ou bien la position de x sur les images droite et gauche pour obtenir le point A.

$$\alpha_T = \tan^{-1}\left(\frac{x_g + (EP/2)}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{EP/2}{D}\right) - \left[ \tan^{-1}\left(\frac{x_d - (EP/2)}{D}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{EP/2}{D}\right) \right]$$

$$\alpha_T = \tan^{-1}\left(\frac{x_g + (EP/2)}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x_d - (EP/2)}{D}\right) - 2 \tan^{-1}\left(\frac{EP/2}{D}\right)$$

si on note :  $x_g = x + y$   
 et  $x_d = x - y$

on obtient alors :

$$\alpha_T = \tan^{-1}\left(\frac{x + y + (EP/2)}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x - y - (EP/2)}{D}\right) - 2 \tan^{-1}\left(\frac{EP/2}{D}\right)$$

### Disparité ajoutée d'un point A

La disparité ajoutée étant :  $\alpha_a = \alpha_T - \alpha_p$

en fonction de l'excentricité x et du décalage de chaque image (+y pour l'œil gauche et -y pour l'œil droit),

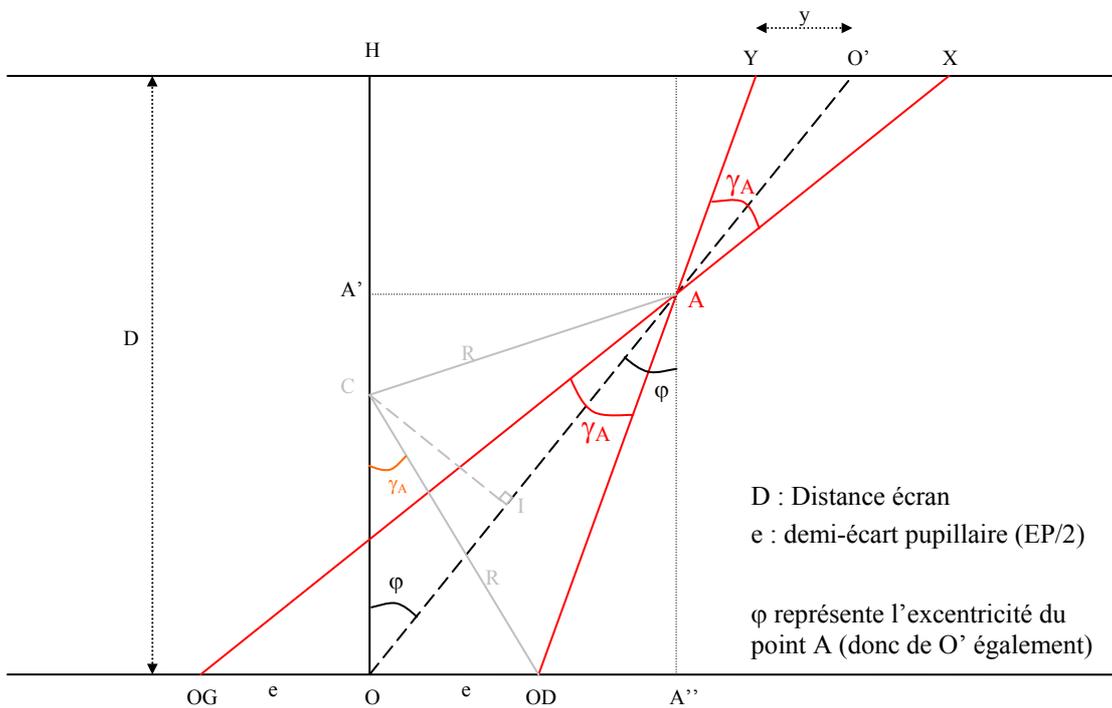
$$\alpha_a = \tan^{-1}\left(\frac{x + y + (EP/2)}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x - y - (EP/2)}{D}\right) - 2 \tan^{-1}\left(\frac{EP/2}{D}\right)$$

$$- \left[ \tan^{-1}\left(\frac{x + (EP/2)}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x - (EP/2)}{D}\right) - 2 \tan^{-1}\left(\frac{EP/2}{D}\right) \right]$$

$$\alpha_a = \tan^{-1}\left(\frac{x + y + (EP/2)}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x - y - (EP/2)}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x + (EP/2)}{D}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{x - (EP/2)}{D}\right)$$

Calcul du décalage de chaque image à partir de la disparité ajoutée

La disparité ajoutée :  $\alpha_a = \gamma_A - \gamma_i$  (cf. Figure 78)



**Figure 92 - Représentation d'un point A de disparité connue dont on souhaite calculer le décalage y, dans le plan de l'écran, des images droite et gauche par rapport à l'excentricité du point A.**

A partir de la Figure 92 et d'après Thalès, on obtient :

$$\frac{e}{y} = \frac{OA}{O'A} \quad \text{d'où} \quad y = \frac{O'A}{OA} \times e = \left( \frac{OO'}{OA} - 1 \right) \times e \quad \text{et} \quad OO' = \frac{D}{\cos \varphi}$$

$$R = \frac{e}{\sin \gamma_A} \quad \text{et} \quad OC = \frac{e}{\tan \gamma_A}$$

$$\sin \hat{CAO} = \frac{CI}{R} \quad \text{sachant que} \quad \sin \varphi = \frac{CI}{OC} \quad \text{et} \quad CI = OC \times \sin \varphi$$

$$\sin \hat{CAO} = \frac{OC}{R} \times \sin \varphi = \sin \varphi \times \cos \gamma_A$$

$$OA = \frac{AA'}{\sin \varphi} \quad \text{avec } AA' = R \times \cos A' \hat{A}C$$

$$\cos A' \hat{A}C = \cos(\pi/2 - \varphi - \sin^{-1}(\cos \gamma_A \times \sin \varphi)) = \sin(\varphi + \sin^{-1}(\cos \gamma_A \times \sin \varphi))$$

$$OA = \frac{AA'}{\sin \varphi} = \frac{R \times \cos A' \hat{A}C}{\sin \varphi} = \frac{R \times \sin(\varphi + \sin^{-1}(\cos \gamma_A \times \sin \varphi))}{\sin \varphi} = \frac{e \times \sin(\varphi + \sin^{-1}(\cos \gamma_A \times \sin \varphi))}{\sin \gamma_A \times \sin \varphi}$$

ainsi le **décalage**  $y$  des images droite et gauche par rapport à l'excentricité  $\varphi$  se calcule de la manière suivante :

$$y = \frac{D \times e}{\cos \varphi \times OA} - e = \frac{D \times \sin \gamma_A \times \sin \varphi \times e}{\cos \varphi \times e \times \sin(\varphi + \sin^{-1}(\cos \gamma_A \times \sin \varphi))} - e$$

et donc

$$y = \frac{D \times \sin \gamma_A \times \tan \varphi}{\sin(\varphi + \sin^{-1}(\cos \gamma_A \times \sin \varphi))} - e$$

La valeur  $\gamma_A$  n'est pas la disparité ajoutée, mais on peut la calculer à partir de la formule de la disparité ajoutée ( $\alpha_a$ ) :

$$\alpha_a = \gamma_A - \gamma_i$$

$$\text{d'où, } \gamma_A = \alpha_a + \gamma_i$$

$$\text{avec } \gamma_i = \tan^{-1}\left(\frac{x + EP/2}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x - EP/2}{D}\right)$$

Sur la Figure 92,  $x$  correspond à la distance HO', H (le point de fixation, f sur les autres figures) étant l'origine de l'axe des  $x$  ( $x$  est positive à droite et négatif à gauche).

$$\text{Et ainsi : } \gamma_A = \alpha_a + \tan^{-1}\left(\frac{x + EP/2}{D}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x - EP/2}{D}\right)$$

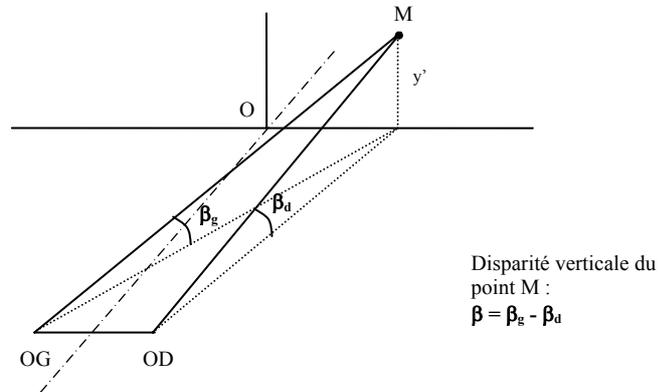
$\alpha_a$  est donc la valeur de disparité ajoutée que l'on souhaite, et à partir de cette valeur on obtiendra le décalage  $y$  des images droite et gauche par rapport à l'excentricité  $x$ .

*Remarque pour le calcul de  $y$*  : dans le cas de disparités croisées, la valeur de disparité ajoutée est positive et  $y$  est *positif* pour l'image correspondant à l'œil gauche et *négatif* pour l'image correspondant à l'œil droit.

*Calculs sur les disparités verticales*

**La disparité verticale**

La disparité verticale absolue d'un point quelconque de l'espace se définit comme la différence d'élévation de ce point dans les deux yeux (Figure 93).



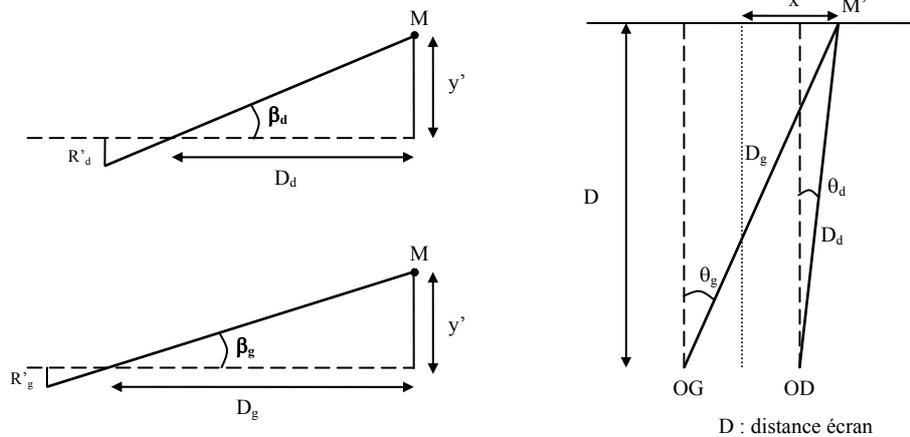
**Figure 93 - Représentation de la disparité verticale d'un point M de l'espace.** Le point O n'est pas nécessairement le point de fixation des deux yeux. Les points O, OD et OG sont dans le plan même plan horizontal. Le point O est dans le plan fronto-parallèle contenant le point M.

La disparité verticale ne dépend pas du point de fixation. Nous ne nous intéresserons qu'à la disparité verticale absolue. La disparité verticale relative étant la différence de disparité verticale absolue entre deux points de l'espace.

Pour les manipulations de la disparité verticale, le système de coordonnées doit être défini : nous utiliserons des repères monoculaires azimuth longitudinal / élévation latitudinale, pour le calcul des angles de chaque œil.

**Le calcul de la disparité verticale**

*La disparité du plan fronto-parallèle*



**Figure 94 - Représentation des paramètres nécessaires pour le calcul de la disparité verticale du point M.** Les angles d'élévation  $\beta_d$  et  $\beta_g$  dans les plans verticaux passant par les axes de visée du point M par les deux yeux (à droite). Dans le plan horizontal passant par les deux yeux (à gauche).

Notons que, dans les Figure 93 et Figure 94, l'œil droit est plus proche du point M que l'œil gauche, et donc  $D_g$  est supérieure à  $D_d$ , et donc  $\beta_d$  est supérieur à  $\beta_g$ .

La disparité verticale d'un point M du plan fronto-parallèle est égale à :

$$\beta_p = \beta_g - \beta_d$$

On a d'abord :

$$\tan \beta_g = \frac{y'}{D_g} \quad \text{et} \quad \tan \beta_d = \frac{y'}{D_d}$$

$$\boxed{y' = D \times \tan y_{ang}}$$

où  $y_{ang}$  est la coordonnée verticale du point M en degrés en système longitudinal-azimut/longitudinal-élévation.

Ou bien  $\boxed{y' = \tan y_{ang} \times \frac{D}{\cos x_{ang}}}$  en système longitudinal-azimut/latitudinal-élévation.

$x' = D \times \tan x_{ang}$  où  $x_{ang}$  est la coordonnée horizontale du point M en degrés.

D'autre part on a,

$$\cos \theta_g = \frac{D}{D_g} \quad \text{et} \quad \cos \theta_d = \frac{D}{D_d}$$

$$\tan \theta_g = \frac{x'+EP/2}{D} \quad \text{et} \quad \tan \theta_d = \frac{x'-EP/2}{D}$$

On obtient ainsi,

$$D_g = \frac{D}{\cos \left( \tan^{-1} \left( \frac{D \times \tan x_{ang} + EP/2}{D} \right) \right)}$$

$$D_d = \frac{D}{\cos \left( \tan^{-1} \left( \frac{D \times \tan x_{ang} - EP/2}{D} \right) \right)}$$

Ou bien en utilisant la formule de Pythagore,

$$D_g^2 = D^2 + (x'+EP/2)^2 = D^2 + (D \times \tan x_{ang} + EP/2)^2$$

$$D_d^2 = D^2 + (x'-EP/2)^2 = D^2 + (D \times \tan x_{ang} - EP/2)^2$$

Enfin, la disparité verticale du point M va donner :

$$\beta_p = \tan^{-1} \left( \frac{D \times \tan y_{ang}}{D_g} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{D \times \tan y_{ang}}{D_d} \right)$$

et selon la formule des distances  $D_g$  et  $D_d$  choisie (cf. ci-dessus), on aura :

$$\beta_p = \tan^{-1} \left( \frac{D \times \tan y_{ang} \times \cos \left( \tan^{-1} \left( \frac{D \times \tan x_{ang} + EP/2}{D} \right) \right)}{D} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{D \times \tan y_{ang} \times \cos \left( \tan^{-1} \left( \frac{D \times \tan x_{ang} - EP/2}{D} \right) \right)}{D} \right)$$

$$\beta_p = \tan^{-1} \left( \tan y_{ang} \times \cos \left( \tan^{-1} \left( \tan x_{ang} + \frac{EP/2}{D} \right) \right) \right) - \tan^{-1} \left( \tan y_{ang} \times \cos \left( \tan^{-1} \left( \tan x_{ang} - \frac{EP/2}{D} \right) \right) \right)$$

ou bien, dans un repère longitudinal-azimut / longitudinal-élévation :

$$\beta_p = \tan^{-1} \left( \frac{D \times \tan y_{ang}}{\sqrt{D^2 + (D \times \tan x_{ang} + EP/2)^2}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{D \times \tan y_{ang}}{\sqrt{D^2 + (D \times \tan x_{ang} - EP/2)^2}} \right)$$

et dans un repère longitudinal-azimut/latitudinal-élévation :

$$\beta_p = \tan^{-1} \left( \frac{D \times \tan y_{ang}}{\cos x_{ang} \times \sqrt{D^2 + (D \times \tan x_{ang} + EP/2)^2}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{D \times \tan y_{ang}}{\cos x_{ang} \times \sqrt{D^2 + (D \times \tan x_{ang} - EP/2)^2}} \right)$$

*La disparité verticale ajoutée*

Il s'agit de la disparité verticale que l'on va introduire en plus de celle du plan de l'écran (plan fronto-parallèle).

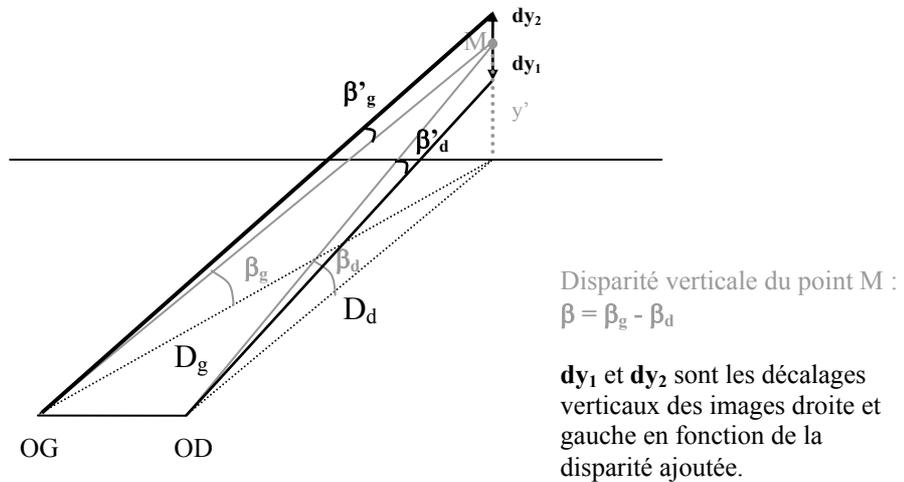


Figure 95 - Représentation des angles permettant le calcul de la disparité verticale, en appliquant un décalage vertical des images droite et gauche.

Pour la disparité ajoutée ( $\beta_a$ ), on a :

$$\beta'_d = -\beta'_g = \beta_a/2$$

Nous cherchons à connaître les valeurs de décalage ( $dy_1$  et  $dy_2$ ) pour une disparité ajoutée donnée ( $\beta_a$ ).

$$dy_1 = D_d \times \tan\left(\beta_d - \frac{\beta_a}{2}\right) - y' = D_d \times \tan\left(\frac{y'}{D_d} - \frac{\beta_a}{2}\right) - y'$$

$$dy_2 = D_g \times \tan\left(\beta_g + \frac{\beta_a}{2}\right) - y' = D_g \times \tan\left(\frac{y'}{D_g} + \frac{\beta_a}{2}\right) - y'$$

Ou bien en coordonnées angulaires ( $y_{ang}$ ), dans un repère longitudinal-azimut/longitudinal-élévation :

$$dy_1 = \sqrt{D^2 + (D \times \tan x_{ang} - EP/2)^2} \times \tan\left(\left(\tan^{-1}\left(\frac{D \times \tan y_{ang}}{\sqrt{D^2 + (D \times \tan x_{ang} - EP/2)^2}}\right)\right) - \frac{\beta_a}{2}\right) - y'$$

$$dy_2 = \sqrt{D^2 + (D \times \tan x_{ang} + EP/2)^2} \times \tan\left(\left(\tan^{-1}\left(\frac{D \times \tan y_{ang}}{\sqrt{D^2 + (D \times \tan x_{ang} + EP/2)^2}}\right)\right) + \frac{\beta_a}{2}\right) - y'$$

Et dans un repère longitudinal-azimut/latitudinal-élévation :

$$dy_1 = \sqrt{D^2 + (D \times \tan x_{ang} - EP/2)^2} \times \tan\left(\left(\tan^{-1}\left(\frac{D \times \tan y_{ang}}{\cos x_{ang} \times \sqrt{D^2 + (D \times \tan x_{ang} - EP/2)^2}}\right)\right) - \frac{\beta_a}{2}\right) - y'$$

$$dy_2 = \sqrt{D^2 + (D \times \tan x_{ang} + EP/2)^2} \times \tan\left(\left(\tan^{-1}\left(\frac{D \times \tan y_{ang}}{\cos x_{ang} \times \sqrt{D^2 + (D \times \tan x_{ang} + EP/2)^2}}\right)\right) + \frac{\beta_a}{2}\right) - y'$$

### *La disparité verticale totale*

La disparité verticale totale ( $\beta_T$ ) est la somme de la disparité verticale du plan fronto-parallèle ( $\beta_p$ ) et de la disparité verticale ajoutée ( $\beta_a$ ) :

$$\beta_T = \beta_p + \beta_a$$

## Annexe 8 - Programme de calcul d'images disparates : détail des calculs effectués par le programme.

Le but de ce programme est de calculer des images binoculaires disparates destinées à être affichées sur le simulateur virtuel. Les images traitées doivent être continues et la fonction de variation de la disparité doit être exprimée en disparité binoculaire introduite.

### Détails des calculs effectués par le programme :

La fonction de ce programme est de calculer une série d'images disparates destinées à être affichées sur le dispositif d'affichage du simulateur virtuel en mode stéréoscopique séquentiel. La fonction de variation de la disparité doit être spécifiée en terme de disparité binoculaire introduite (disparité de la nappe simulée - disparité du plan) et l'image de départ doit pouvoir être un bitmap quelconque. Ceci implique une variation de la disparité continue sur l'ensemble de l'image.

*Input* : une image .bmp et une fonction de variation de la disparité

*Output* : une série d'images .bmp

Pour calculer les images disparates, la méthode est de parcourir l'image de départ, et à chaque pixel est associée une excentricité qui permet de calculer sa disparité. Cette méthode a l'inconvénient de devoir suréchantillonner l'image de départ avec toujours un risque de ne pas remplir certains pixels de l'image d'arrivée.

L'image de départ est supposée être M fois plus grande que l'image finale. Les tailles des pixels pour l'image de départ et de destination sont les suivantes :

$$\text{TaillePixelSource} = \frac{M \times \text{LargeurEcran}}{\text{NombrePixelsLargeurSource}}$$

$$\text{TaillePixelDestination} = \frac{\text{LargeurEcran}}{\text{NombrePixelsLargeurDestination}}$$

On effectue ensuite un changement de repère dans l'image source pour avoir un repère centré sur l'image :

x,y : coordonnées dans le repère « machine » du bitmap

x',y' : coordonnées dans le repère centré du bitmap

$$x' = x - \text{NombrePixelsLargeurSource}/2$$

$$y' = \text{NombrePixelsHauteurSource}/2 - y$$

On obtient ensuite les valeurs angulaires  $x_{\text{ang}}$  et  $y_{\text{ang}}$  de ces coordonnées :

$$x_{\text{ang}} = \tan^{-1} \left( \frac{x' \times \text{TaillePixelSource}}{\text{Dis tan ceEcran}} \right)$$

$$y_{\text{ang}} = \tan^{-1} \left( \frac{y' \times \text{TaillePixelSource}}{\text{Dis tan ceEcran}} \right)$$

Ces calculs de  $y_{ang}$  et  $x_{ang}$  sont ceux correspondant à un système de coordonnées où l'azimut et l'élévation sont longitudinaux.

Pour un système de coordonnées azimut-longitudinal / élévation-latitudinale (repère le plus physiologique utilisé pour les disparités verticales), seul le calcul de la valeur de  $y_{ang}$  est modifiée de la façon suivante :

$$y_{ang} = \tan^{-1} \left( \frac{y' \times TaillePixelSource}{Dis\ tan\ ce} \right)$$

où Distance est la distance entre le point de référence et le centre du repère (Figure 96).

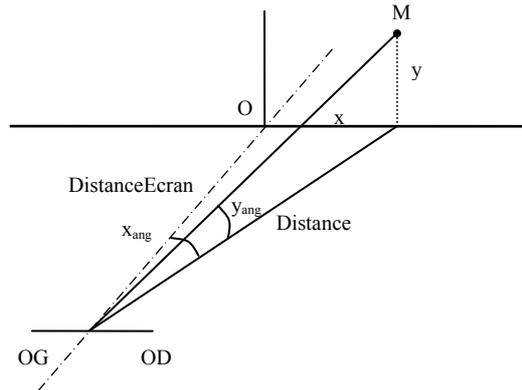


Figure 96 - coordonnées d'un point M quelconque pour un système de coordonnées azimut-longitudinale / élévation-latitudinale.

$$\cos(x_{ang}) = \frac{Dis\ tan\ ce\ Ecran}{Dis\ tan\ ce}$$

$$y_{ang} = \tan^{-1} \left( \frac{y' \times TaillePixelSource \times \cos(x_{ang})}{Dis\ tan\ ce\ Ecran} \right)$$

Est ensuite calculée la valeur de la disparité introduite  $\alpha'$  en fonction des excentricités  $x_{ang}$  et  $y_{ang}$  pour les fonctions choisies par l'utilisateur.

- **Dans le plan horizontal :**

La disparité introduite  $\alpha'$  est la différence entre l'angle ( $\gamma_A$ ) sous lequel est vu le point disparate par les deux yeux et l'angle ( $\gamma_i$ ) sous lequel est vu le point correspondant du plan par les deux yeux (Figure 97).

La formule de la disparité introduite, ou disparité ajoutée, est :  $\alpha' = \gamma_A - \gamma_i$

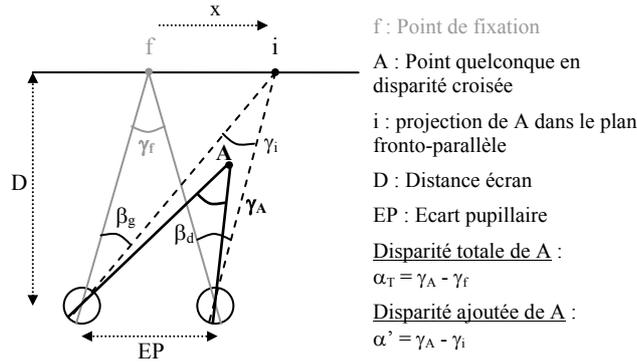


Figure 97 - Représentation d'un point quelconque disparate A et calcul de la disparité introduite (ou disparité ajoutée).

Ainsi, on obtient :

$$\gamma_A = \alpha' + \gamma_i \quad \text{où } \alpha' \text{ est la disparité ajoutée (valeur choisie par l'utilisateur).}$$

La valeur de l'angle  $\gamma_i$  correspond à :

$$\gamma_i = \tan^{-1}\left(\frac{DistEcran \times \tan(x_{ang}) + EP/2}{DistEcran}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{DistEcran \times \tan(x_{ang}) - EP/2}{DistEcran}\right)$$

où  $EP/2 = \text{EcartPupillaire}/2$

La disparité ajoutée ( $\alpha'$ ) est répartie entre les images droite et gauche. Le demi-déplacement horizontal  $dx$  (en distance) est donné par la formule (cf. démonstration du calcul dans Annexe 7):

$$dx = \frac{DistEcran \times \tan(x_{ang}) \sin \gamma_A}{\sin(x_{ang} + \sin^{-1}(\cos \gamma_A \times \sin(x_{ang})))} - EP/2$$

en pixels, cette valeur  $dx_{pix}$  vaut :

$$dx_{pix} = \frac{dx}{TaillePixelDestination}$$

On obtient ainsi les abscisses  $X_D$  et  $X_G$  des images droites et gauches :

$$X_D = \frac{DistEcran \times \tan(x_{ang})}{TaillePixelDestination} + dx_{pix} = \frac{TaillePixelSource}{TaillePixelDestination} \times x' + dx_{pix}$$

$$X_G = \frac{TaillePixelSource}{TaillePixelDestination} \times x' - dx_{pix}$$

- **Dans le plan vertical :**

La disparité  $\beta$  de la nappe correspond à :

$$\beta = \beta' + \text{DisparitéVerticalePlan} = \beta' + (\beta_{pG} - \beta_{pD})$$

$$\text{avec } \beta_{pD} = \tan^{-1} \left( \frac{\text{DistEcran} \times \tan(y_{ang})}{\sqrt{(\text{DistEcran}^2 + (\text{DistEcran} \times \tan(x_{ang}) - EP/2)^2)}} \right)$$

$$\text{et } \beta_{pG} = \tan^{-1} \left( \frac{\text{DistEcran} \times \tan(y_{ang})}{\sqrt{(\text{DistEcran}^2 + (\text{DistEcran} \times \tan(x_{ang}) + EP/2)^2)}} \right)$$

La disparité millimétrique est répartie entre les images droite et gauche. Les demi-déplacements verticaux  $dy_D$  et  $dy_G$  (en distance, et positif vers le haut / négatif vers le bas dans les coordonnées centrées du bitmap) sont donnés par les formules :

*Remarque* : DisparitéVerticalePlan :  $\beta_p = \beta_{pG} - \beta_{pD}$

Et la disparité angulaire induite sera répartie également sur les deux yeux :

$$\beta' = \beta'_G - \beta'_D$$

$$\text{avec } \beta'_G = -\beta'_D = \beta'/2$$

On a alors :

$$dy_D = \text{DistOD} \times \tan(\beta_{pD} - \beta'/2) - \text{DistEcran} \times \tan(y_{ang})$$

$$dy_G = \text{DistOG} \times \tan(\beta_{pG} + \beta'/2) - \text{DistEcran} \times \tan(y_{ang})$$

$$\text{DistOD} = \sqrt{(\text{DistEcran}^2 + (\text{DistEcran} \times \tan(x_{ang}) - EP/2)^2)}$$

$$\text{DistOG} = \sqrt{(\text{DistEcran}^2 + (\text{DistEcran} \times \tan(x_{ang}) + EP/2)^2)}$$

En pixels, ces valeurs  $dy_{Dpix}$  et  $dy_{Gpix}$  deviennent :

$$dy_{Dpix} = \frac{dy_D}{\text{TaillePixelDestination}} \quad \text{Remarque : il s'agit de la taille des pixels en vertical}$$

$$dy_{Gpix} = \frac{dy_G}{\text{TaillePixelDestination}}$$

On obtient ainsi les ordonnées  $Y_D$  et  $Y_G$  des images droite et gauche :

$$Y_D = \frac{\text{DistEcran} \times \tan(y_{ang})}{\text{TaillePixelDestination}} + dy_{Dpix} = \frac{\text{TaillePixelSource}}{\text{TaillePixelDestination}} \times y' + dy_{Dpix}$$

$$Y_G = \frac{\text{TaillePixelSource}}{\text{TaillePixelDestination}} \times y' + dy_{Gpix}$$

**NB** : Pour le calcul du décalage horizontal,  $\gamma_A$  n'est pas exactement la disparité horizontale ajoutée, et il ne faudra pas oublier d'ajouter l'angle  $\gamma_i$  à  $\alpha'$  pour obtenir  $\gamma_A$ . Par contre, pour le calcul du décalage vertical ci-dessus  $\beta'$  est la disparité verticale introduite. Dans le programme, nous rentrerons néanmoins les valeurs de disparités horizontale ( $\alpha'$ ) et verticale ( $\beta'$ ) que l'on souhaite introduire.

**Annexe 9 - Formulaire d'information et de consentement de participation donné à remplir et signer aux observateurs.**

**FORMULAIRE D'INFORMATION ET  
CONSENTEMENT DE PARTICIPATION**

de M.....(nom, prénom)

**MESURE DE SEUILS DE PERCEPTION DE PROFONDEUR**

Essilor International me propose de participer à une étude comportementale en psychophysique.

J'ai reçu et j'ai bien compris les informations suivantes :

- Le but est de mesurer ma sensibilité à des déformations de surface en simulation virtuelle.
- L'étude se déroulera en 2 ou 3 séances d'environ 30 minutes.
- Les mesures se feront au moyen d'un simulateur d'image virtuelle et de lunettes 3D.
- Les mesures consistent en un jugement de la perception de déformation d'une image en relief.
- Lors des mesures, un contrôle de la fixation sera réalisé grâce à un appareil d'électro-oculographie, nécessitant la pose préalable de 3 électrodes cutanées. Ces électrodes sont collées sur la peau à proximité des yeux, au niveau des tempes et sur le front, mais elles ne sont pas invasives.

Les risques prévisibles peuvent être des maux de tête en fin d'expérimentation.

DANS LES CONDITIONS PRECISEES CI-DESSUS, J'ACCEPTÉ EN TOUTE LIBERTE DE PARTICIPER À CETTE RECHERCHE, APRES AVOIR EU UN DELAI DE REFLEXION SUFFISANT.

Mon consentement ne décharge pas les organisateurs de la recherche de leurs responsabilités. **Je conserve tous mes droits garantis par la loi.**

Si je le désire, je serai libre à tout moment d'arrêter ma participation.

Les données qui me concernent resteront strictement confidentielles. Je n'autorise leur consultation que par des personnes qui collaborent à la recherche, désignées par l'organisateur, Céline DEVISME.

J'ai été informé que mon identité n'apparaîtra dans aucun rapport ou publication et que toute information me concernant sera traitée de façon confidentielle. J'accepte que les données enregistrées à l'occasion de cette étude puissent être conservées dans une base de données et faire l'objet d'un traitement informatisé non nominatif par Essilor International. J'ai bien noté que le droit d'accès prévu par la loi "Informatique et liberté" modifiée par la loi n° 94-548 du 1<sup>er</sup> Juillet 1994 s'exerce à tout moment auprès d'Essilor International.

Je pourrai à tout moment demander toute information complémentaire.

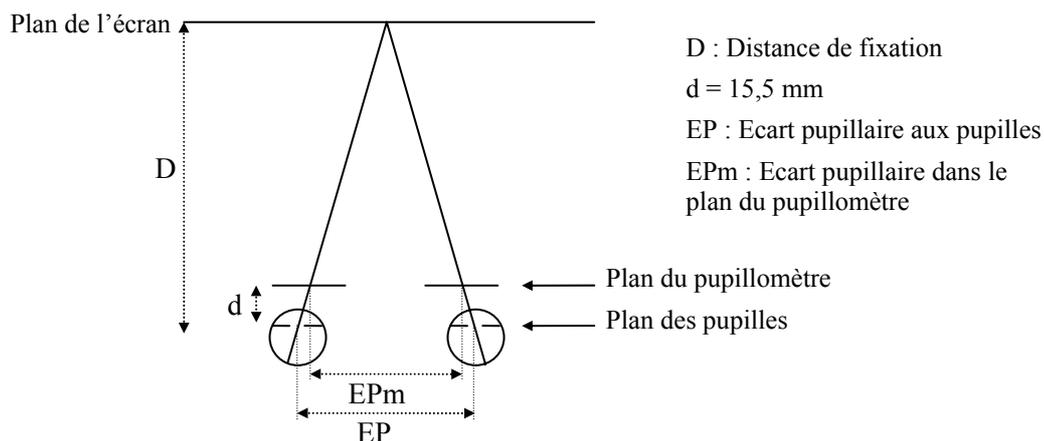
Fait à ....., le .....

Nom et signature de l'expérimentateur

Signature du volontaire

### Annexe 10 - Calcul des écarts pupillaires vrais (dans le plan des pupilles) à partir de la mesure des écarts pupillaires au pupillomètre à reflets cornéens.

La mesure des écarts pupillaires se fait au pupillomètre à reflets cornéens, c'est-à-dire dans le plan des réticules de l'appareil, et non dans le plan des pupilles, les yeux convergeant à la distance souhaitée. Le schéma ci-dessous représente le plan de la mesure et le plan des pupilles dans lequel on souhaite avoir la mesure des écarts pupillaires.



D'après le théorème de Thalès, on a :

$$\frac{EP}{EPm} = \frac{D}{D-d} \quad \text{avec } d = 15,5 \text{ mm}$$

Et ainsi,

$$\boxed{EP = \frac{D \times EPm}{D - 15,5}}$$

Les variables étant en millimètre.

## Annexe 11 – Données individuelles de l'analyse de l'influence des post-effets.

### Comparaison des seuils en fonction du sens du post-effet pour chaque observateur

La Figure 98 représente les graphiques correspondants, pour chaque observateur, à la valeur des seuils de détection d'une déformation en fonction du sens du post-effet.

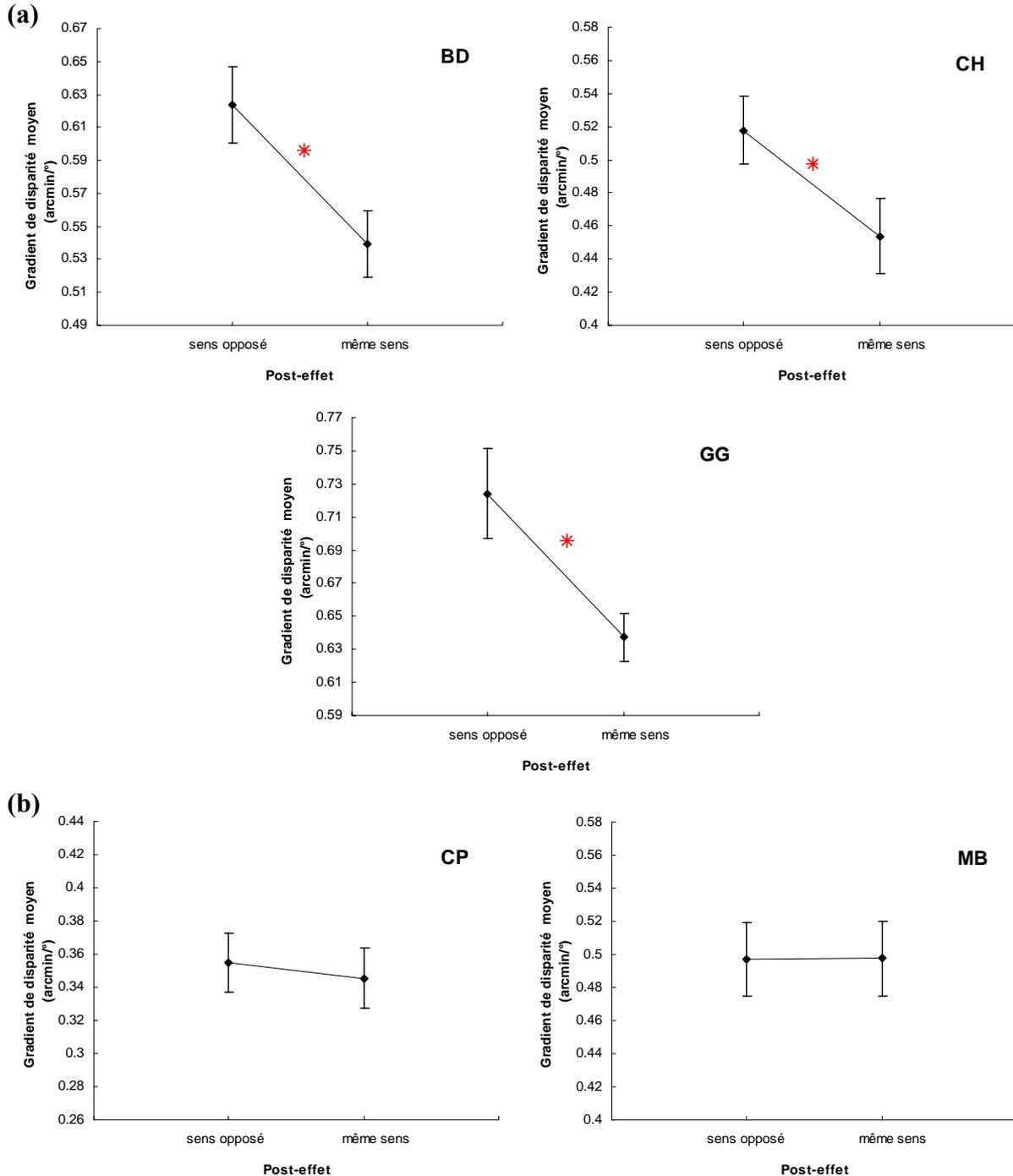


Figure 98 - Comparaison des seuils de détection d'une déformation selon le sens du post-effet pour les cinq observateurs. Le post-effet est soit dans le sens opposé, soit dans le même sens que la série présentée. (a) Un astérisque rouge indique une différence significative au seuil de 0,05 entre les deux valeurs considérées. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type.

Les valeurs maximales et minimales des échelles ne sont pas les mêmes pour chaque graphique à cause des différences inter-individuelles des seuils de détection de déformation que nous avons déjà mentionnées par ailleurs. Néanmoins, l'unité d'écart des échelles est de  $0,02 \text{ arcmin}/^\circ$  pour les cinq graphiques et les écarts sont de même dimension sur chaque graphique, ce qui nous permet de comparer visuellement l'écart des seuils d'un graphique à l'autre. Ainsi, les différences entre les seuils pour un post-effet dans le même sens et les seuils pour un post-effet de sens opposé sont significatives pour trois observateurs (Figure 98(a) BD, CH et GG), avec un seuil de significativité de 0,05 (BD et GG :  $p < 0,001$  ; CH :  $p = 0,004^{38}$ ). Cette différence de seuils va dans le même sens pour les trois observateurs, à savoir des seuils plus faibles quand le post-effet est dans le même sens.

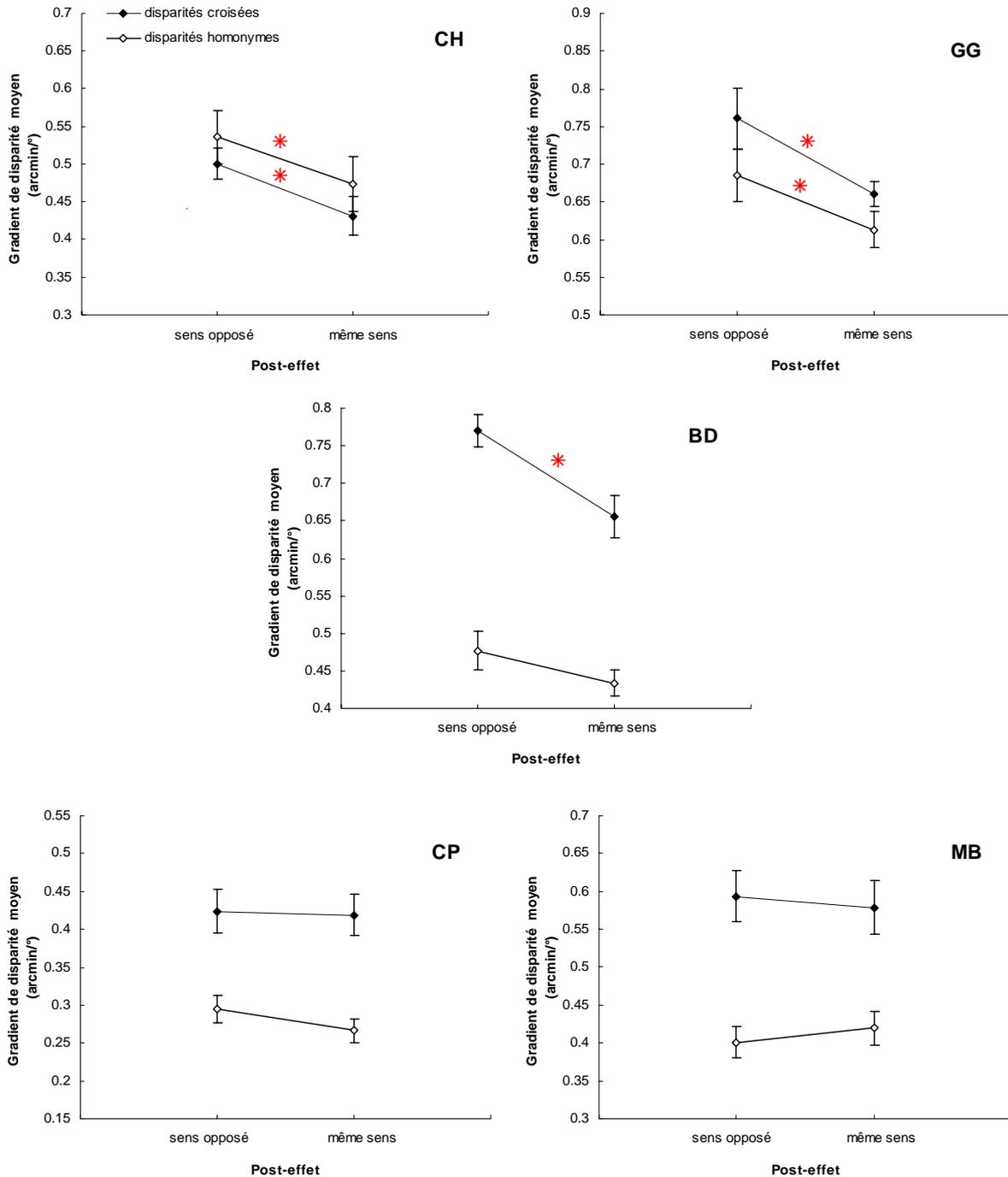
Par contre, pour les deux autres observateurs (Figure 98(b) CP et MB), la différence de seuils selon le type de post-effet est très faible (CP :  $p = 0,68$  et MB :  $p = 0,99^{38}$ ).

---

<sup>38</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effets : post-effet \* observateurs.

### Résultats individuels selon le signe de la disparité horizontale

Pour chaque observateur, individuellement, la Figure 99 résume l'évolution des seuils des gradients de disparité au seuil de détection d'une déformation en fonction du sens du post-effet.



**Figure 99 - Comparaison des seuils de détection d'une déformation en fonction du sens du post-effet, selon le type de disparité, pour les cinq observateurs.** Le post-effet est soit dans le sens opposé, soit dans le même sens que la série présentée. Le sens de la déformation est noté en termes de disparité : les disparités croisées sont schématisées par les losanges pleins, et les disparités homonymes par les losanges vides. Un astérisque rouge indique une différence significative au seuil de 0,05 entre les deux valeurs considérées. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type.

Les valeurs maximales et minimales des échelles ne sont pas les mêmes pour chaque graphique toujours à cause des différences inter-individuelles des seuils de détection de déformation, mais également à cause des différences de seuils entre les disparités croisées et homonymes. Néanmoins, l'unité d'écart des échelles est de 0,05 arcmin/° pour les cinq graphiques. Ainsi, on constate que les différences entre les seuils pour un post-effet dans le même sens et ceux pour un post-effet de sens opposé sont significatives pour les disparités croisées chez trois observateurs (BD, CH et GG). Pour les disparités homonymes, cette différence est significative chez deux observateurs (CH et GG), avec un seuil de significativité de 0,05 (BD et GG, disparités croisées :  $p < 0,01$  ; CH et GG, disparités homonymes :  $p < 0,05^{39}$ ). Cette différence de seuils va dans le même sens pour les trois observateurs, à savoir des seuils plus faibles quand le post-effet est dans le même sens. Pour l'observateur BD, en disparité homonyme, la différence de seuils est très faible (non significative :  $p = 0,16^{39}$ ), alors que nous avons vu qu'elle est significative pour les disparités croisées.

Enfin, pour les deux derniers observateurs (CP et MB), la différence de seuils selon le type de post-effet est très faible, en disparités croisées (CP :  $p = 0,88$  et MB :  $p = 0,65^{39}$ ), comme en disparités homonymes (CP :  $p = 0,39$  et MB =  $0,55^{39}$ ).

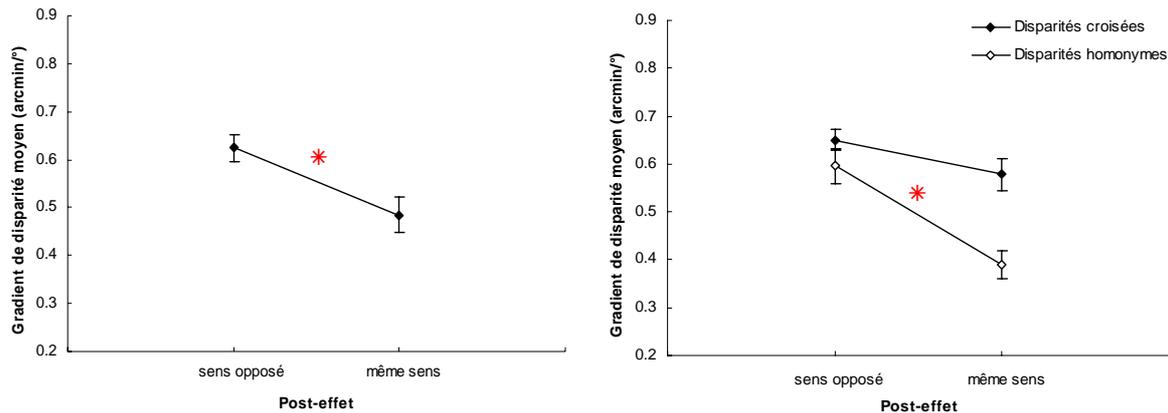
---

<sup>39</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue uniquement en présence de post-effet ; effets : post-effet \* observateurs \* signe de la disparité.

### Etude détaillée des « post-effets infraliminaires »

Ces valeurs sont analysées en fonction du sens (concave ou convexe) réel de la série précédente par comparaison au sens de la série en question.

Comme le montre la Figure 100 (graphique de gauche), même dans le cas des post-effets dits « infraliminaires », on retrouve une différence significative entre les seuils dont le post-effet prédit est de même sens et ceux de sens opposés (ANOVA<sub>post-effet</sub> :  $F_{1,59} = 4,25$  ;  $p = 0,04^{40}$ ).



**Figure 100 - Représentation des seuils de détection d'une déformation, concave ou convexe, d'une surface plane en fonction du sens du post-effet prédit – cas des réponses précédentes infraliminaires.** Le graphique de gauche regroupe les deux types de disparité. Pour le graphique de droite, le sens de la déformation est noté en termes de disparité : les disparités croisées sont schématisées par les losanges pleins, et les disparités homonymes par les losanges vides. Un astérisque rouge indique une différence significative au seuil de 0,05 entre les deux valeurs considérées. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type.

Le graphique de droite de la Figure 100 compare les seuils en fonction du signe du post-effet, selon le type de disparité. Les seuils suivent des variations semblables pour les disparités croisées et homonymes, en effet le test d'ANOVA ne montre pas d'interaction significative entre les deux types de disparité (ANOVA<sub>post-effet\*signe de disparité</sub> :  $F_{1,59} = 1,38$  ;  $p = 0,25^{40}$ ). Pourtant, les seuils sont significativement différents selon le signe du post-effet pour les disparités homonymes (test post-hoc :  $p < 0,001^{41}$ ), et ne le sont pas pour les disparités croisées (test post-hoc :  $p = 0,09^{41}$ ).

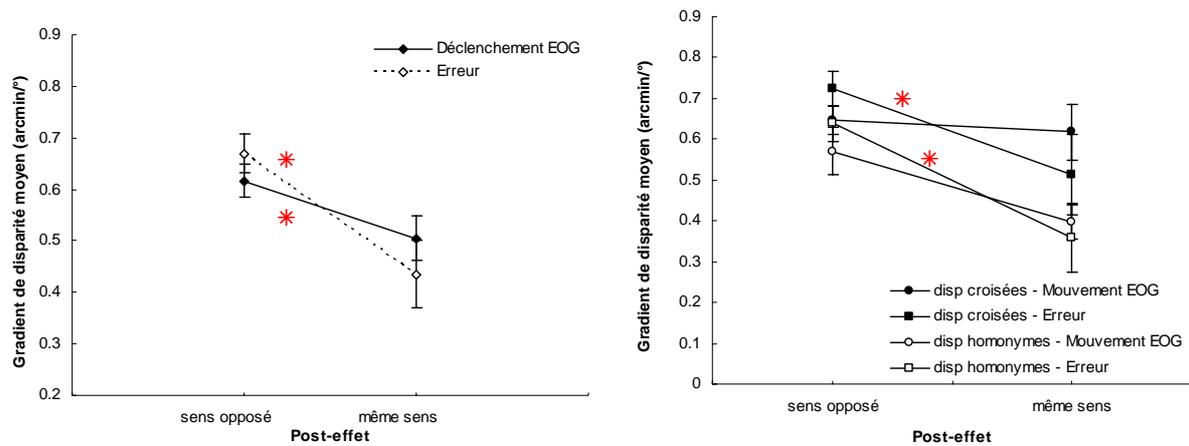
De même, les gradients de disparité varie de manière semblable en fonction du sens du post-effet, entre les observateurs (ANOVA<sub>post-effet\*observateur</sub> :  $F_{4,59} = 0,67$  ;  $p = 0,61^{40}$ ) : en effet, les observateurs ont le même comportement de leurs gradients moyens selon le sens du post-effet, mais ils ne présentent pas de différences significatives de valeurs de gradient selon

<sup>40</sup> ANOVA : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue pour les mesures rejetées ; variables catégorielles : observateurs, signe de la disparité, série et sens du post-effet (opposé ou même).

<sup>41</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effets : post-effet \* signe de la disparité.

le post-effet (test post-hoc :  $p > 0,05^{42}$ ). Il est important de noter qu'il y a peu de valeurs pour chaque observateur.

Enfin, pour aller plus loin dans l'analyse, nous avons dissocié les seuils faisant suite à une réponse infraliminaire due au déclenchement de l'EOG, et ceux suite à une réponse erronée au choix forcé (Figure 101, graphique de gauche)). Les seuils sont différents en fonction du sens du post-effet dans les deux cas (test post-hoc :  $p < 0,01^{43}$ ). L'influence du post-effet est plus importante pour les post-effets infraliminaires par erreur à la mesure précédente, mais il ne faut pas oublier que ça ne concerne que 20 mesures, contre 71 pour le cas du déclenchement de l'EOG.



**Figure 101 - Représentation des seuils de détection d'une déformation, concave ou convexe, d'une surface plane en fonction du sens du post-effet prédit infraliminaire, selon la cause de la réponse infraliminaire.**

Le graphique de gauche regroupe les deux types de disparité : Les losanges pleins représentent le cas du déclenchement de l'EOG à une saccade exploratrice par exemple, et les losanges vides quand il s'agissait d'une erreur dans la réponse au choix forcé. Pour le graphique de droite, le sens de la déformation est noté en termes de disparité : les disparités croisées sont schématisées par les formes pleines, et les disparités homonymes par les formes vides. Un astérisque rouge indique une différence significative au seuil de 0,05 entre les deux valeurs considérées. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type.

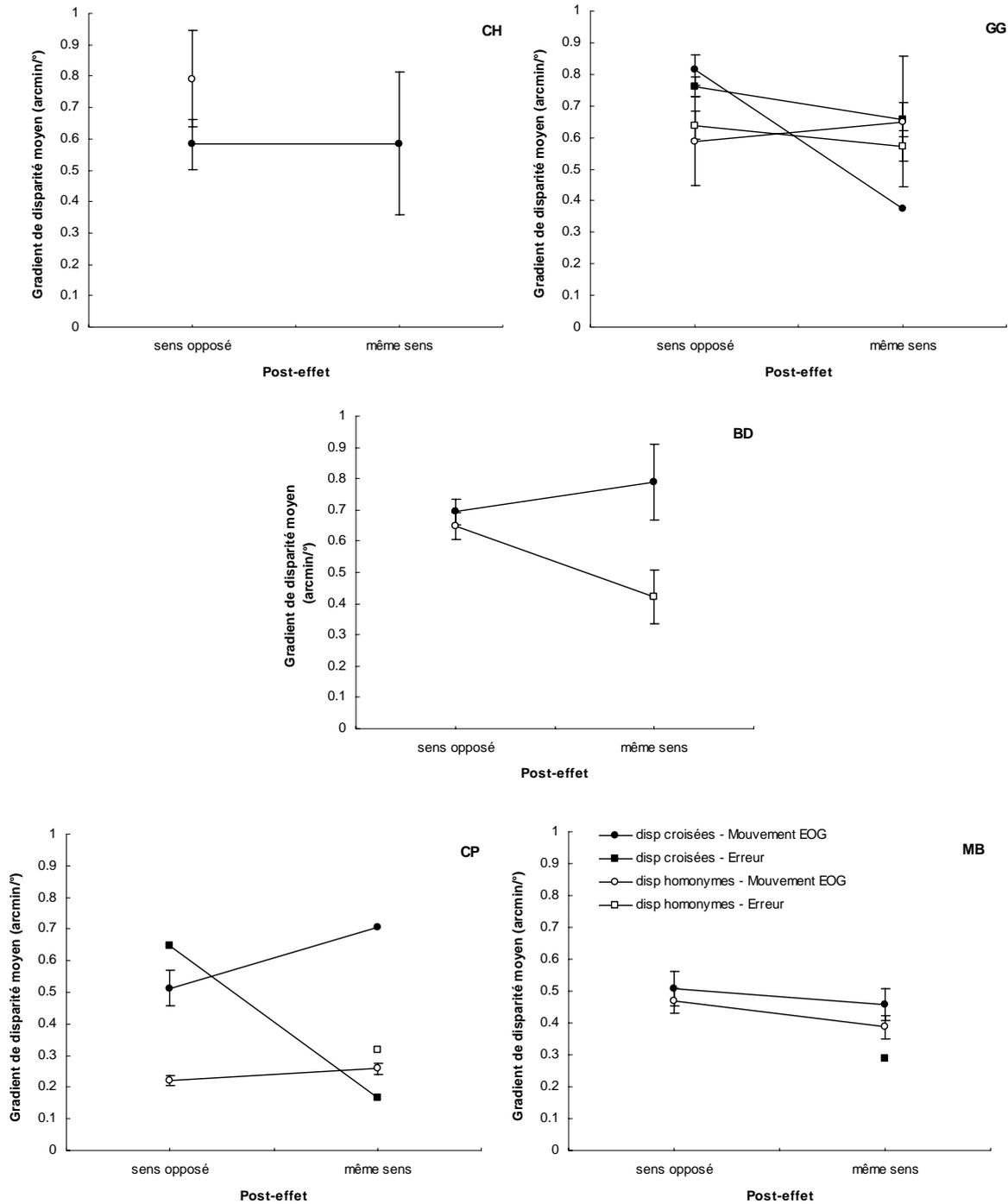
De même, dans les deux cas et comme on peut l'observer sur le graphique de droite de la Figure 101, l'influence du post-effet infraliminaire n'est significative que pour les disparités homonymes (test post-hoc :  $p < 0,006^{44}$ ), renforçant les résultats globaux.

Les résultats individuels contiennent un nombre limité, voire nul dans certains cas, et inégal de valeurs pour chaque condition (disparités croisées-homonymes / erreur-déclenchement EOG) donc ne peuvent pas être analysés statistiquement, mais peuvent néanmoins être représentés graphiquement (Figure 102).

<sup>42</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effets : post-effet \* observateurs.

<sup>43</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effets : post-effet \* type de réponse infraliminaire.

<sup>44</sup> Test Post-hoc LSD de Fisher : variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effets : post-effet \* type de réponse infraliminaire \* signe de la disparité.



**Figure 102 - Représentation des seuils de détection d'une déformation, concave ou convexe, d'une surface plane en fonction du sens du post-effet prédit infraliminaire, selon la cause de la réponse infraliminaire et pour chaque observateur.** Les ronds représentent le cas du déclenchement de l'EOG à une saccade exploratrice par exemple, et les carrés quand il s'agissait d'une erreur dans la réponse au choix forcé. Les formes pleines correspondent aux disparités croisées et les formes vides aux disparités homonymes. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type.

Les graphiques pour chaque observateur ne semblent pas faire ressortir d'influences du sens du post-effet globalement. Pourtant en regardant plus précisément, on peut noter que les post-effets faisant suite à des erreurs (points carrés de la Figure 102) suivent la même tendance que les post-effets liminaires, à savoir des seuils plus élevés pour un post-effet de

sens opposé et des seuils plus faibles pour un post-effet de même sens. Rappelons que ce cas de post-effet infra-liminaire ne concerne que 20 valeurs et s'est principalement produit chez l'observateur GG. Pour les déclenchements de l'EOG, qui constituent un plus grand nombre de valeurs, on ne retrouve pas toujours la tendance générale.

### ***Etude de l'influence de la taille de la déformation***

Pour l'analyse statistique, nous avons utilisé le test post-hoc de Fisher<sup>45</sup> afin de comparer, selon le signe du post-effet, le diamètre du post-effet (plus exactement le rayon de la série précédente) par rapport au diamètre de la série étudié (son rayon). Les observateurs ont été pris en compte comme variable catégorielle pour l'ANOVA, mais n'ont pas pu être dissocié pour le détail de l'étude des diamètres afin d'avoir un nombre de valeurs raisonnable pour chaque combinaison.

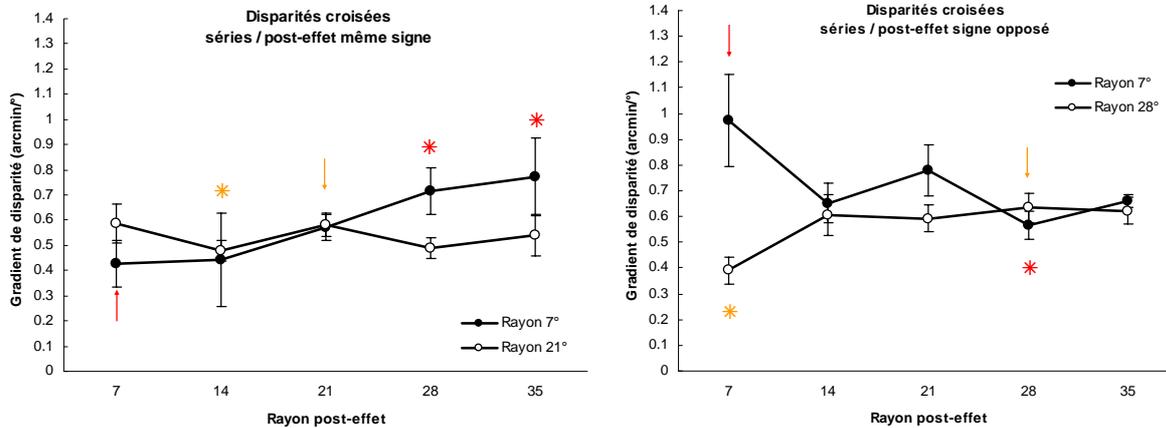
Les comparaisons ne montrent pas de différences significatives au seuil de significativité de 5 %, sauf pour cinq cas (sur 19) :

*En disparité croisée (Figure 103) :*

- pour une série de rayon 7°, précédée d'un post-effet de même sens (graphique de gauche), le seuil de post-effet de rayon 7° (flèche rouge) est significativement différent de ceux de 28 et 35° (astérisques rouges :  $p < 0,02$ ) : le seuil moyen des post-effets de rayon 7° étant inférieur aux seuils moyens des post-effets de 28 et 35°. Les écart-types sont importants pour ces séries de rayon 7°, essentiellement du au fait que ces séries comportent moins de valeurs. La tendance indiquerait néanmoins qu'un post-effet de même diamètre améliore la détection de la déformation.
- pour une série de rayon 21°, précédée d'un post-effet de même sens, le seuil de post-effet de 21° de rayon (graphique de gauche, flèche orange) est significativement différent de celui de 14° (astérisque orange :  $p = 0,04$ ). Dans ce cas, le seuil moyen des post-effets de rayon 21° est supérieur au seuil moyen des post-effets de 14°. Ces deux valeurs sont significativement différentes entre elles, mais, séparément, elles ne sont significativement différentes ni l'une ni l'autre des autres valeurs obtenues pour les autres diamètres.
- pour une série de rayon 7°, précédée d'un post-effet de sens opposé (graphique de droite), le gradient moyen de post-effet de 7° de rayon (flèche rouge) est significativement différent de celui de 28° (astérisque rouge :  $p = 0,006$ ). Le seuil moyen des post-effets de rayon 7° est supérieur au seuil moyen des post-effets de 28°, il est également significativement supérieur aux seuils moyens des post-effets de même sens ayant des rayons de 7, 14 et 21° (comparaison des points pleins des deux graphiques de la Figure 103,  $p < 0,01$ <sup>45</sup>). Il semblerait qu'un post-effet de signe opposé et de même rayon augmente les seuils de détection par rapport aux autres post-effets pour la série de rayon 7°.
- pour une série de rayon 28°, précédée d'un post-effet de sens opposé, le seuil de post-effet de 28° de rayon (graphique de droite, flèche orange) est significativement différent de celui de 7° (astérisque orange :  $p = 0,007$ ). Dans ce cas, le seuil moyen des post-effets de

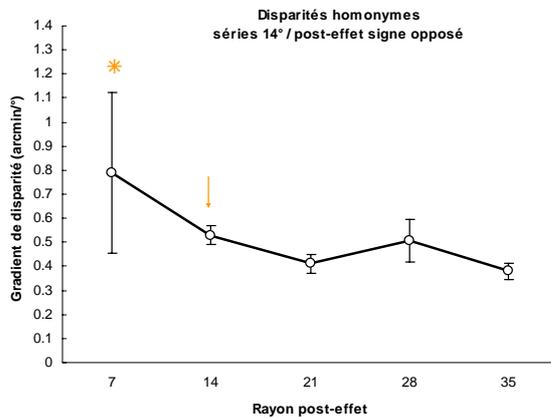
<sup>45</sup> Tests Post-hoc LSD de Fisher selon le type de disparité (croisée / homonyme): variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effets : signe du post-effet \* taille (rayon) du post-effet \* taille (excentricité de fin) de la série mesurée.

rayon 7° est inférieur au seuil moyen des post-effets de même diamètre, soit un rayon de 28°. Il est également inférieur aux seuils moyens des post-effets de sens opposé pour les autres diamètres ( $p < 0,05^{45}$ ). On retrouve une fois de plus une influence des post-effets de 7° de diamètre, mais dans ce cas il améliorerait la détection de la déformation de 28° de diamètre et de sens opposé. Ou bien il pénaliserait moins la détection d'une déformation de 28° de rayon par rapport aux post-effets de plus grands rayons, quand ils sont de signe opposé.



**Figure 103 - Comparaison des seuils de détection d'une déformation concave (disparité croisée) de surface plane en fonction du diamètre du post-effet par rapport au diamètre de la déformation – cas des déformations de rayons 7, 21 et 28°.** Le post-effet est de même signe que la déformation, à gauche, et de signe opposé à la déformation, à droite. Les flèches indiquent les valeurs de référence, de diamètres identiques entre le post-effet et la déformation mesurée, valeurs auxquelles sont comparées les autres de diamètre de post-effet différent (le diamètre est en fait noté en rayon). Les astérisques indiquent une différence significative par rapport à la valeur de référence de même couleur. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type.

*En disparité homonyme (Figure 104) :*



**Figure 104 - Comparaison des seuils de détection d'une déformation convexe (disparité homonyme) de surface plane en fonction du diamètre du post-effet par rapport au diamètre de la déformation – cas des déformations de 14° de rayon.** Le post-effet est de signe opposé à la déformation. La flèche orange indique la valeur de référence, de diamètres identiques entre le post-effet et la déformation mesurée, valeur à laquelle sont comparées les autres de diamètre de post-effet différent (le diamètre est en fait noté en rayon). L'astérisque indique une différence significative par rapport à la valeur de référence. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type.

Pour une série de rayon 14°, précédée d'un post-effet de sens opposé, le seuil de post-effet de 14° de rayon est significativement différent de celui de 7° ( $p = 0,004$ ) : le seuil moyen

des post-effets de rayon 14° étant inférieur au seuil moyen des post-effets de 7° (cf. Figure 104). De même, le seuil moyen obtenu pour un post-effet de sens opposé et de rayon 7° est supérieur aux seuils obtenus pour tous les autres rayons de post-effet, et quelle que soit le signe du post-effet ( $p < 0,015^{45}$ ). Mais il est important de noter que l'écart-type est très important pour la valeur de seuil concernant un post-effet de 7° de rayon. Ceci signifierait que, dans ce cas, un post-effet de plus petit diamètre influence la détection de déformation de surface plane et rend peut-être le jugement plus difficile. Par contre un post-effet de même diamètre n'améliore, ni ne détériore, la détection par rapport à un post-effet de diamètre supérieur.

### ***Etude de l'influence de l'excentricité de départ de la déformation***

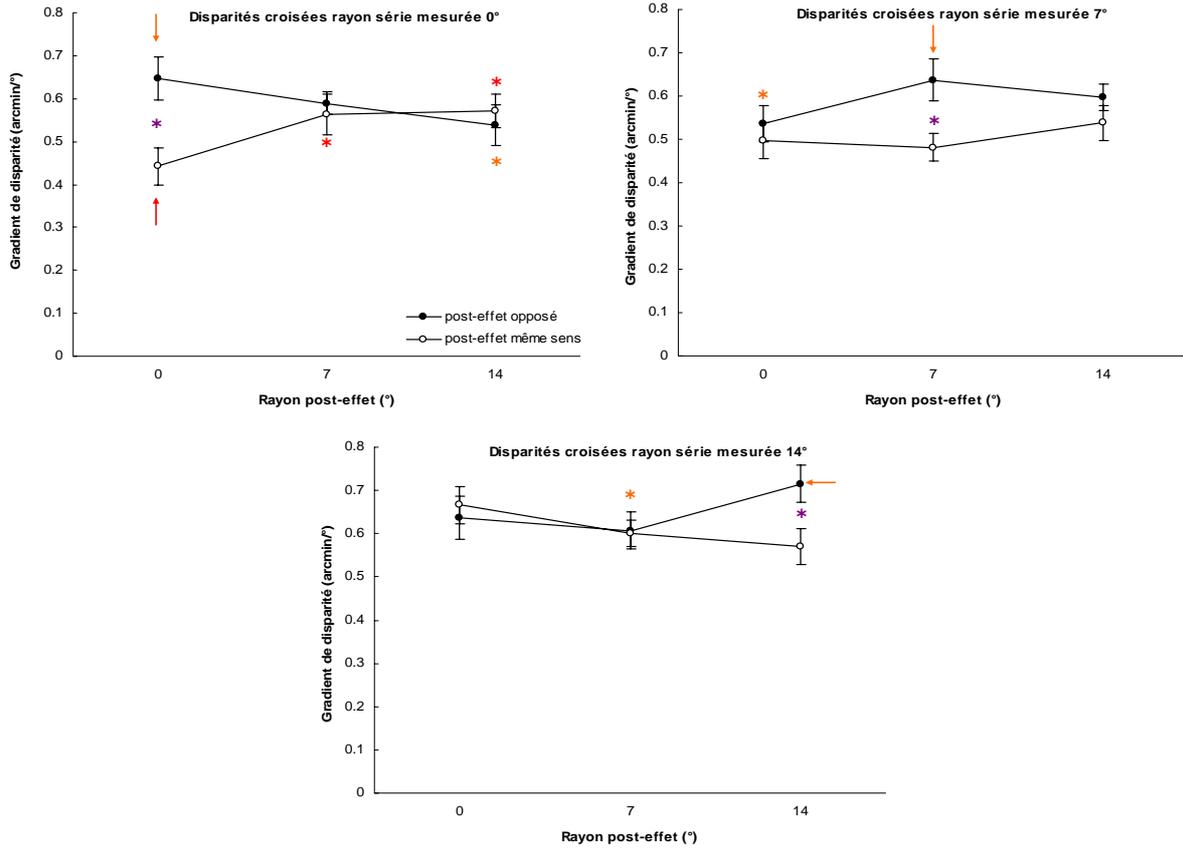
Pour l'analyse statistique, nous avons utilisé le test post-hoc de Fisher<sup>46</sup> afin de comparer, selon le signe du post-effet, l'excentricité de départ du post-effet par rapport à celle de la série étudié. Les observateurs ont été pris en compte comme variable catégorielle pour l'ANOVA, mais n'ont pas pu être dissocié pour le détail de l'étude des excentricités de départ afin d'avoir un nombre de valeurs raisonnable pour chaque combinaison. Les résultats significatifs (Tests post-hoc :  $p < 0,05^{46}$ ) représentés par des astérisques sur les Figure 105 et Figure 106 indiquent d'abord qu'on observe des différences significatives surtout entre les post-effets de sens contraire à la mesure. Plus précisément, les seuils sont fréquemment plus élevés quand le post-effet de sens contraire est de même excentricité de départ.

Dans le seul cas où l'on observe une différence pour des post-effets de même sens que la mesure (graphique en haut à gauche, Figure 105), c'est-à-dire pour une excentricité de départ de 0°, les seuils sont moins élevés pour les post-effets de même excentricité de départ (0°). Notons que pour les disparités homonymes (Figure 106), seules les mesures d'excentricité 7° montrent des différences significatives : quand le post-effet est de sens contraire à la mesure et de même excentricité de départ, les seuils sont plus élevés que pour les post-effets opposés d'excentricités de départ différentes.

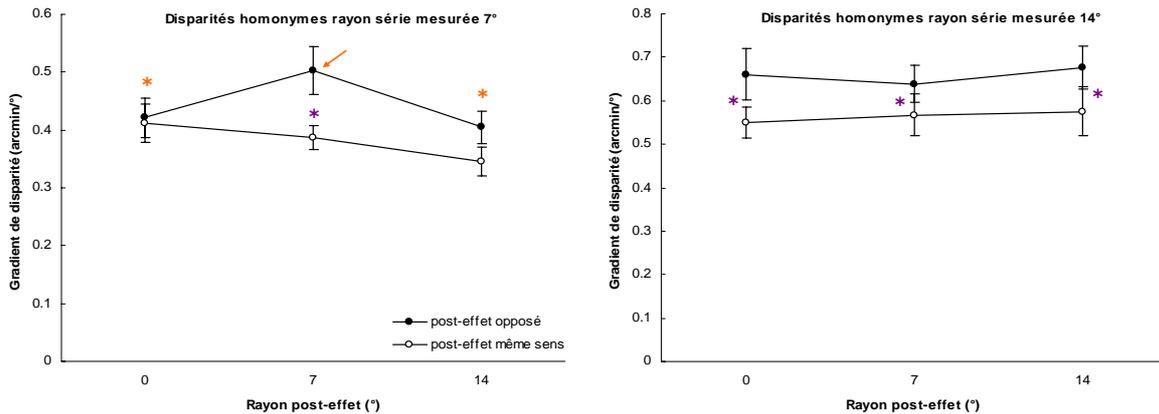
D'autre part, on observe également dans 5 cas sur 6 que les seuils de détection d'une déformation varient significativement selon le sens du post-effet quand le post-effet et la mesure présentent les mêmes excentricités de départ (astérisques prunes, Figure 105 et Figure 106). Ce résultat n'est retrouvé pour des post-effets d'excentricité de départ différente (mais identique entre post-effet de même sens et de sens opposé) à la mesure que dans le cas des disparités homonymes et de la mesure d'excentricité de départ 14°.

---

<sup>46</sup> Tests Post-hoc LSD de Fisher selon le type de disparité (croisée / homonyme): variable dépendante : gradient de disparité en valeur absolue ; effets : signe du post-effet \* excentricité de départ du post-effet \* excentricité de départ de la série mesurée.



**Figure 105 - Comparaison des seuils de détection d'une déformation concave (disparité croisée) de surface plane en fonction du rayon central du post-effet par rapport à celui de la déformation – rayons centraux de 0, 7 et 14°. Le post-effet est de même signe que la déformation pour les ronds creux et de signe opposé à la déformation pour les ronds pleins. Les flèches indiquent les valeurs de référence, de rayons identiques entre le post-effet et la déformation mesurée, valeurs auxquelles sont comparées les autres de rayon de post-effet différent. Les astérisques indiquent une différence significative par rapport à la valeur de référence de même couleur, les astérisques prunes une différence significative selon le sens du post-effet pour des rayons de post-effet et de mesure identiques. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type.**



**Figure 106 - Comparaison des seuils de détection d'une déformation convexe (disparité homonyme) de surface plane en fonction du rayon central du post-effet par rapport à celui de la déformation – cas des rayons centraux de 7 et 14°. Le post-effet est de même signe que la déformation pour les ronds creux et de signe opposé à la déformation pour les ronds pleins. Les flèches indiquent les valeurs de référence, de rayons identiques entre le post-effet et la déformation mesurée, valeurs auxquelles sont comparées les autres de rayon de post-effet différent. Les astérisques oranges indiquent une différence significative par rapport à la valeur de référence, les astérisques prunes une différence significative selon le sens du post-effet pour des rayons de post-effet et de mesure identiques. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type.**

## Annexe 12 – Expérience de stimuli constants modifiée.

Une méthode modifiée de stimuli constants a été mise en place, où le stimulus est une présentation ascendante du niveau choisi. Il s'agit d'un intermédiaire entre des stimuli constants et un ajustement ascendant.

### *Expérience préliminaire méthode des limites*

*Expérience préliminaire pour estimer la zone du seuil, par la méthode des limites ascendante* : seule la présentation ascendante a été retenue car dans le cas des mesures de seuils de perception de relief, il peut y avoir des phénomènes de persévération, pour une présentation ordonnée descendante. Pour chaque observateur, on regarde les valeurs de part et d'autre du seuil (la dernière image non perçue et la première image perçue). Cette valeur sera une première estimation du seuil et servira de valeur centrale pour définir les cinq valeurs de la méthode des stimuli constants. Pour GG et MB, la première estimation en termes de numéro d'image se trouve environ à la 20<sup>ème</sup> image.

Type de disparité horizontale	n° série	Pente max 100 images (°/°) disparité horizontale	Pas (°/°) disparité horizontale	image arrêt présentation ascendante	valeur gradient à l'arrêt (arcmin./°)
disparités croisées	0	0.023	0.00023	5	0.069
	1	0.023	0.00023	15	0.207
	2	0.023	0.00023	25	0.345
disparités homonymes	3	-0.018	-0.00018	5	-0.054
	4	-0.018	-0.00018	15	-0.162
	5	-0.018	-0.00018	25	-0.27

Tableau 11 - Définition des différentes séries pour l'expérience des stimuli constants modifiée.

### *La méthode de stimuli constants modifiée avec seuils ascendants*

La seconde expérience utilisera une méthode de stimuli constants modifiée : dans ce cas, les stimuli constants sont une présentation successive d'images pour lesquelles la valeur du gradient de disparité va augmenter à partir d'une valeur nulle jusqu'à une valeur prédéterminée (Figure 107). Il ne s'agit pas d'une méthode d'ajustement car l'observateur ne contrôle rien, il ne peut arrêter le défilement des images. Le *choix forcé* de cette méthode de stimuli constants modifiée est également une qualification (concave/convexe) de la forme perçue (ou non, dans ce cas c'est le hasard).

Pour cette expérience, trois valeurs de gradient de disparité pour l'image binoculaire finale sont choisies, pour chacune des disparités croisées ou homonymes. Pour chaque valeur, le plus grand nombre de répétition est requis afin d'obtenir un pourcentage de bonne réponse : compte tenu de la durée de chaque présentation (moins d'une minute) et du nombre de cas à tester (3 valeurs × 2 types de disparité), le maximum de répétition serait idéal (sachant que le cas idéal serait 100 répétitions pour chaque valeur de disparité). De même, on obtiendra une courbe psychométrique par disparités (croisées / homonymes) pour les trois mêmes observateurs.

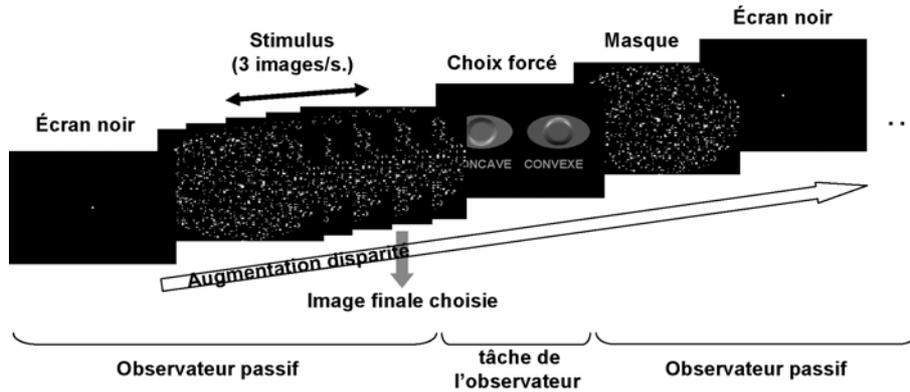


Figure 107 - déroulement de la première expérience : une méthode de stimuli constants modifiée.

Ainsi nous pourrions comparer les courbes psychométriques obtenues lors de l'expérience de stimuli constants purs et celles de la présente expérience. De même, les valeurs de seuils extraites des courbes psychométriques pourront être comparées avec les valeurs de seuils obtenues avec la méthode d'ajustement ascendant.

Pour cette expérience modifiée, nous avons définis les valeurs sur les seuils obtenus lors de l'expérience d'ajustement ascendant. Trois valeurs par signe de gradient de disparité ont donc été déterminées au préalable. Dans cette méthode modifiée, les stimuli constants sont une présentation ascendante d'une valeur de gradient de disparité définie. Pour chaque observateur, un graphique peut ainsi être tracé pour l'ensemble des six valeurs de disparités (les disparités croisées en valeurs positives et les disparités homonymes en valeurs négatives). Les six points de chaque graphique vont être interpolés par une courbe psychométrique de meilleure approximation.

La courbe psychométrique est une sigmoïde d'équation : 
$$y = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)}}$$

En Annexe 13 se trouve le détail des différents paramètres ( $a$ ,  $x_0$  et  $b$ ) définissant les courbes psychométriques de meilleure approximation pour chaque observateur. De même, l'algorithme ayant permis l'ajustement des résultats par une sigmoïde se trouve en Annexe 13. Les courbes psychométriques correspondant à chaque observateur se trouvent en Figure 108. Ces courbes vont indiquer la sensibilité aux disparités croisées et homonymes, mais ne vont pas donner réellement une valeur de seuil. Il s'agit d'une capacité à discriminer le concave et le convexe. Cette dernière information sera donnée par la pente de la courbe au voisinage de 50 % de réponse « concave ».

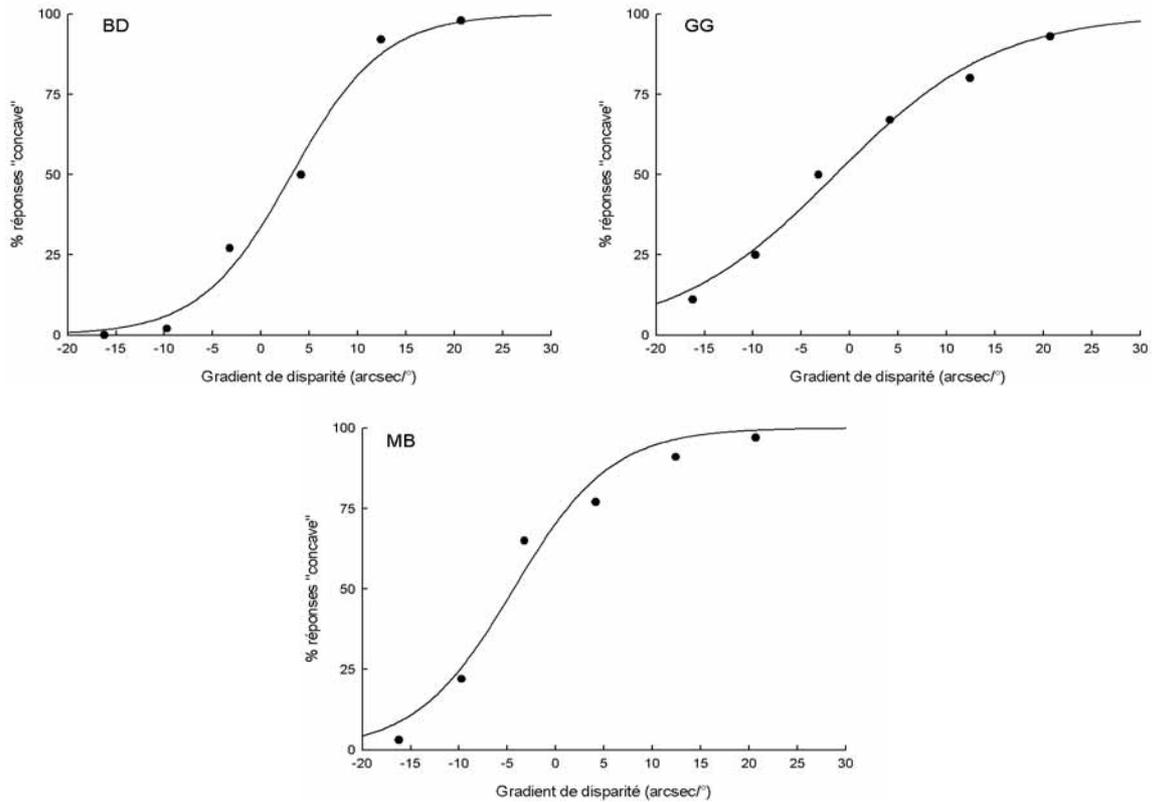


Figure 108 - Courbes psychométriques du pourcentage de réponses « concave » en fonction du gradient de disparité, pour chaque observateur.

Pour chacune des courbes de meilleure approximation, les paramètres importants sont : le biais, correspondant à  $x_0$  ou la valeur du gradient de disparité pour laquelle on obtient 50% de réponse « concave » ; la pente de la courbe au voisinage des 50 % de réponses « concave ». Le Tableau 12 résume ces paramètres pertinents pour chaque observateur.

Observateur	Seuils méthode d'ajustement		Stimuli constants ascendants			
	Disparités croisées (arcsec/°)	Disparités homonymes (arcsec/°)	Biais (arcsec/°)	Pente	% Seuil ajustement croisées	% Seuil ajustement homonymes
BD	41.12	-26.56	3.16	5.30	99.97	0.18
GG	47.2	-38.42	-1.49	3.01	99.72	1.16
MB	44.16	-32.83	-4.36	4.96	99.99	0.35

Tableau 12 - Paramètres (biais, pente) définissant la courbe psychométrique et position des seuils obtenus par la méthode d'ajustement ascendant sur la courbe psychométrique obtenue avec la méthode de stimuli constant modifiée, pour chaque observateur : les disparités croisées sont notées en valeurs positives et les disparités homonymes en valeurs négatives.

D'une part, le biais, correspondant à 50 % de bonnes réponses (concave ou convexe), indique le hasard dans la réponse. Comme nous l'avons vu dans la précédente expérience, au voisinage de ces 50 % de bonnes réponses, le gradient de disparité correspond à une perception de plan fronto-parallèle. Le biais peut donc être également appelé seuil de planéité. Cette valeur de biais est assez différente d'un observateur à l'autre : Pour BD, elle est plutôt positive (3,16 arcsec/°), correspondant à des disparités croisées et indiquant une perception plutôt convexe du plan fronto-parallèle. Pour MB, comme pour GG, le biais est négatif, donc

en disparité homonyme. Le biais de MB est relativement élevé (-4,36 arcsec/°) signifiant une perception plutôt concave du plan fronto-parallèle. Enfin GG présente un biais négatif mais relativement plus proche de zéro (-1,49 arcsec/°).

D'autre part, les pentes des courbes, au voisinage de 50 % de réponses « concave », sont assez variables selon les observateurs : les pentes sont de valeurs proches pour MB et BD et relativement élevée (respectivement 4,96 et 5,30), par opposition la pente est plus douce pour GG (3,01). Ces résultats, en terme de pente, indiquent que BD et MB ont une capacité à discriminer le concave du convexe plus serrée que GG. En d'autre terme, la zone de perception de planéité est faible chez les observateurs BD et MB, et elle est plus large pour GG.

Enfin, à partir des équations des courbes psychométriques, on peut situer les seuils obtenus précédemment avec la méthode d'ajustement ascendant sur les différentes courbes et obtenir le pourcentage de réponse « concave » correspondant. Le Tableau 12 rappelle les différents seuils obtenus par la méthode d'ajustement, pour les disparités croisées et pour les disparités homonymes, et indique le pourcentage relatif à chaque courbe. Pour les disparités croisées, pour les trois observateurs, les pourcentages de réponses « concave » sont très proches de 100 %. Pour les disparités homonymes, les pourcentages sont très proches de 0 % pour BD et MB, mais il est très légèrement supérieur pour GG (1,16 %). Aussi peut-on dire que les seuils obtenus avec la méthode d'ajustement ascendant se situent dans une zone supérieure à 99 % de bonnes réponses (concave ou convexe). Ces seuils se situent donc dans une zone de certitude de perception dans le bon sens.

En conclusion de cette expérience de stimuli constants modifiée : les seuils de perception de planéité ne correspondent pas toujours exactement à une disparité nulle. Par exemple, l'observateur BD aurait une perception plutôt convexe du plan fronto-parallèle, cette tendance est faiblement renforcée par un pourcentage de réponses « convexe » de 66 % pour un gradient de disparité nul, la courbe psychométrique de BD présentant pourtant une pente assez élevée. L'observateur MB aurait, quant à lui, une perception légèrement concave du plan fronto-parallèle. De même que pour BD, la pente de la courbe psychométrique de MB est assez élevée, entraînant un pourcentage de 70 % de réponses « concave » pour un gradient nul, renforçant faiblement la tendance mise en évidence par le biais. Par contre, pour cette expérience, GG présente un biais relativement proche de zéro, et avec une pente plutôt faible, le gradient de disparité nul montre un pourcentage proche de 50 %, insuffisant pour indiquer une préférence concave. Enfin par les pentes, on obtient la largeur de la zone de perception de planéité ou la capacité à discriminer le concave du convexe : Pour BD et MB, la zone de perception de planéité est plutôt courte et la discrimination est fine, contrairement à GG. Les seuils obtenus par la méthode d'ajustement ascendant se trouve être à des pourcentages dits de sécurité (zone de 100 % de bonnes réponses)

**Annexe 13 - Définitions des courbes psychométriques correspondant aux pourcentages de réponses dans une direction en fonction de la valeur de gradient de disparité, pour les deux expériences en stimuli constants et pour chaque observateur.**

L'équation de la courbe sigmoïde utilisée est la suivante :  $y = y_0 + \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)}}$

Dans notre cas, la valeur minimale ( $y_0$ ) du pourcentage de réponses « concave » (choix arbitraire permettant d'avoir une courbe allant de 0 à 100 % des valeurs de disparité négative aux valeurs positives) doit être nulle, l'équation suivante sera finalement utilisée :

$$y = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)}}$$

Le logiciel SigmaPlot® utilise l'algorithme Marquardt-Levenberg pour obtenir la courbe d'approximation de nos données. Cet algorithme permet de trouver les coefficients (paramètres) des variables indépendantes qui donnent la meilleure approximation entre l'équation et les données. Cet algorithme cherche les valeurs des paramètres qui minimisent la somme des différences au carré entre les valeurs observées et les valeurs prédites de la variable dépendante :

$$SS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2$$

où  $y_1$  est la valeur observée et  $y_2$  la valeur prédite de la variable dépendante.

Cette méthode est itérative – l'interpolation de la courbe commence par une « supposition » des paramètres, vérifie la bonne équation d'approximation, et continue d'améliorer les suppositions jusqu'à ce que les différences entre la somme des carrés résiduelle ne diminuent plus significativement. Cette condition est connue sous le terme de convergence. Nous avons fixé le nombre d'itérations de l'algorithme à 1000 pour avoir la meilleure approximation possible.

D'autre part, la valeur maximale en pourcentage de réponse « concave » ne pourra être supérieure à 100 %. Aussi cette valeur ( $y_{\max}$ ), correspondant à la variable  $a$  de l'équation de la sigmoïde, sera-t-elle contrainte à 100.

L'équation de la courbe psychométrique devient donc :  $y = \frac{100}{1 + e^{-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)}}$

De ces courbes d'ajustement des données, pour chaque observateur, nous allons retirer les informations suivantes :

- Le biais, c'est-à-dire  $x_0$ , la valeur de gradient de disparité correspondant à 50 % de réponse « concave ».

- La pente de la courbe à 50 % de réponse « concave » égale à  $\frac{25}{b}$ .

Calcul de la pente :

$$\text{Pour } x \approx x_0, \text{ on a } e^{-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)} \approx 1 - \frac{x-x_0}{b}$$

$$\text{Ainsi } y = \frac{100}{2 - \frac{x-x_0}{b}} = \frac{50}{1 - \frac{x-x_0}{2 \times b}}$$

$$\text{Egalement si } x \approx x_0, \text{ on obtient } y \approx 50 \left( 1 + \frac{x-x_0}{b} \right)$$

$$\text{Donc } y \approx 50 + \frac{25(x-x_0)}{b}$$

Ce qui permet d'obtenir la pente de la courbe à 50 % de réponse « concave » :  $\frac{25}{b}$

**Caractéristiques des courbes psychométriques des deux expériences :**

(cf. Figures x, y et z pour les stimuli constants purs et Figures f, g et h pour les stimuli constants ascendants)

Les variables sont notés de la façon suivante : y(max) correspond à a, b et le biais correspond à  $x_0$  (valeur du gradient de disparité pour 50 % de réponses « concave »). Ces trois variables définissent l'équation de la courbe sigmoïde de meilleure approximation des données de chaque observateur. Enfin la pente indique, comme nous l'avons défini ci-dessus, la pente de la courbe au point correspondant à 50 % de réponses « concave ». Le Tableau 13 résume les valeurs de ces variables pour chaque observateur et pour l'expérience de stimuli constants pure :

Observateur	y(max)	b	Biais	Pente
BD	100.00	2.61	3.72	9.56
GG	100.00	7.33	-2.31	3.41
MB	100.00	4.68	0.63	5.35

**Tableau 13 - Caractéristiques des courbes psychométriques pour l'expérience de stimuli constants purs, pour chaque observateur.**

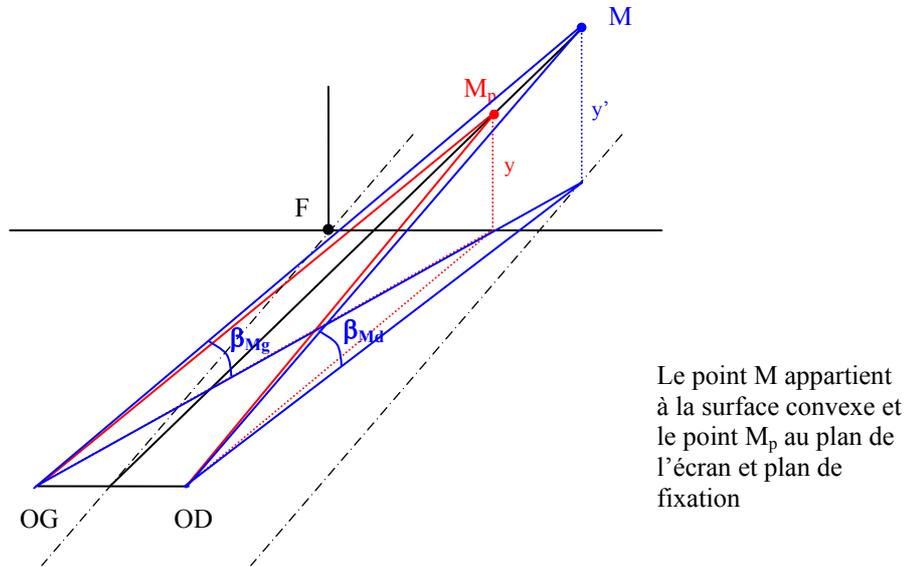
Le Tableau 14 résume les valeurs des variables définies ci-dessus pour chaque observateur et pour l'expérience de stimuli constants ascendants :

Observateur	y(max)	b	Biais	Pente
BD	100.00	4.72	3.16	5.30
GG	100.00	8.31	-1.49	3.01
MB	100.00	5.04	-4.36	4.96

**Tableau 14 - Caractéristiques des courbes psychométriques pour l'expérience de stimuli constants ascendants, pour chaque observateur.**

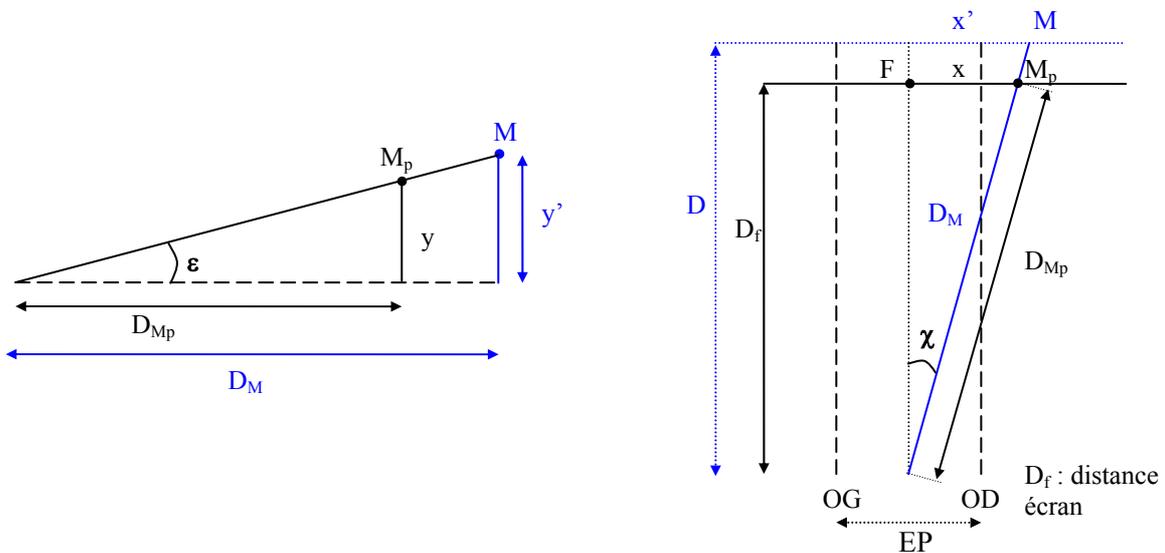
**Annexe 14 - Calcul de la disparité verticale d'un point en fonction de sa distance par rapport à l'observateur.**

*Disparité verticale d'un point quelconque*



**Figure 109 - Représentation des angles d'élévation droit et gauche pour les points M et M<sub>p</sub>, pour le calcul de la disparité verticale de M et de la disparité verticale ajoutée**

*Grandeurs nécessaires*



**Figure 110 - Représentation dans le plan vertical contenant le point M et le centre des deux yeux (le centre du segment interoculaire), à gauche. Vue de dessus de l'axe de visée du point M à partir du centre des deux yeux, à droite.**

Pour calculer les disparités verticales en fonction de x et de y, nous avons besoin de plusieurs valeurs :

- $D = D_f + d + D'$   $D'$  étant le décalage en profondeur que l'on souhaite appliqué pour la disparité verticale. d est la distance du point M par rapport au plan de fixation (d < 0 signifie en avant du plan et d > 0 en arrière du plan)
- $x' = D \times \tan \chi$

$$- \cos \chi = \frac{D_f}{D_{Mp}} = \frac{D}{D_M} \qquad D_M = \frac{D}{\cos \chi}$$

$$- \tan \varepsilon = \frac{y}{D_{Mp}} = \frac{y \times \cos \chi}{D_f}$$

$$- y' = D_M \times \tan \varepsilon$$

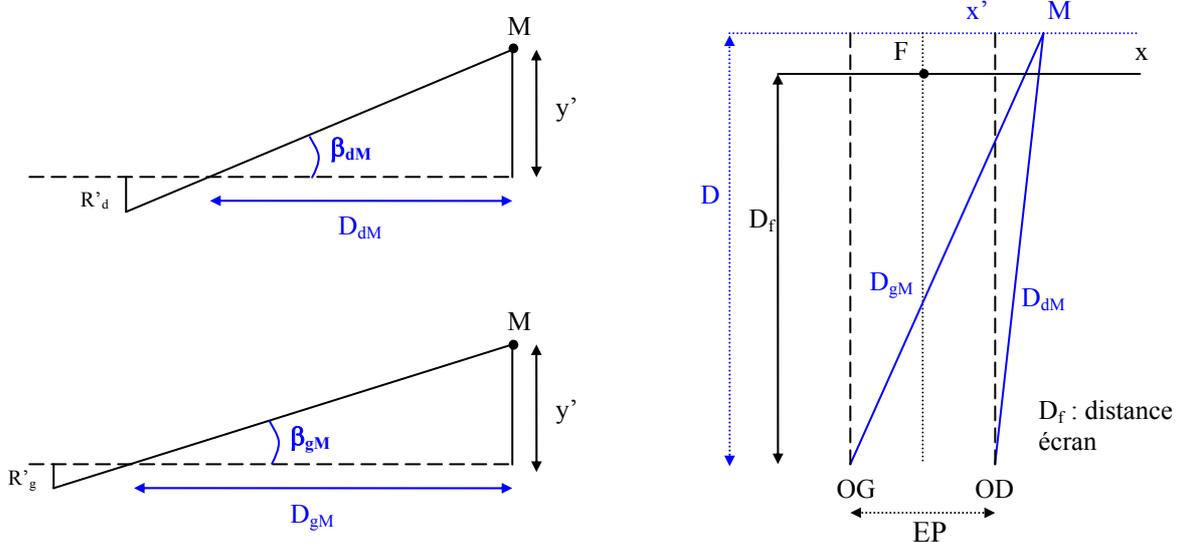
$$\boxed{y' = \frac{D \times \tan \varepsilon}{\cos \chi}}$$

$$\text{ou bien } y' = \frac{D \times \frac{y}{D_{Mp}}}{\frac{D_f}{D_{Mp}}} = \frac{D \times y}{D_f}$$

$$\boxed{y' = y \times \frac{D}{D_f}}$$

**Disparité verticale totale d'un point M**

La Figure 111 représente les angles d'élevation du point M, correspondant à l'œil gauche ( $\beta_{gM}$ ) et à l'œil droit ( $\beta_{dM}$ ) permettant de calculer la disparité verticale du point M en fonction des coordonnées (x,y) du point  $M_p$  (Figure 109).



**Figure 111 - Représentation en vue de dessus (à droite) des distances  $D_d$  et  $D_g$  d'un point M par rapport aux deux yeux.** Représentations dans les plans verticaux contenant l'axe de visée (à gauche) du point M pour l'œil droit (en haut) et pour l'œil gauche (en bas).

Tout d'abord, le calcul des distances  $D_{gM}$  et  $D_{dM}$  du point M par rapport aux deux yeux en fonction de D, distance du point M au plan contenant l'axe interoculaire :

$$- D_{gM}^2 = D^2 + (x' + EP/2)^2$$

$$\text{ou bien, } D_{gM} = \sqrt{D^2 + (D \times \tan \chi + EP/2)^2}$$

$$- D_{dM}^2 = D^2 + (x' - EP/2)^2$$

$$\text{ou bien, } D_{dM} = \sqrt{D^2 + (D \times \tan \chi - EP/2)^2}$$

Calcul de la disparité verticale d'un point quelconque M :

$$\beta_M = \beta_{gM} - \beta_{dM}$$

$$- \beta_{gM} = \tan^{-1} \left( \frac{y'}{D_{gM}} \right)$$

$$\beta_{gM} = \tan^{-1} \left( \frac{D \times \tan \varepsilon}{\cos \chi \times \sqrt{D^2 + (D \times \tan \chi + EP/2)^2}} \right)$$

$$- \beta_{dM} = \tan^{-1} \left( \frac{y'}{D_{dM}} \right)$$

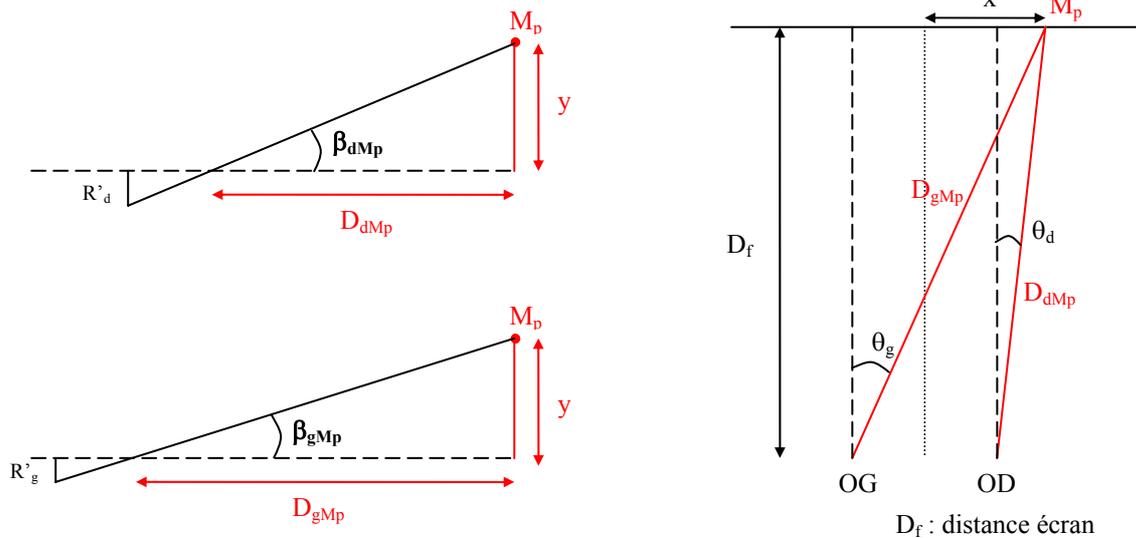
$$\beta_{dM} = \tan^{-1} \left( \frac{D \times \tan \varepsilon}{\cos \chi \times \sqrt{D^2 + (D \times \tan \chi - EP/2)^2}} \right)$$

Ainsi on obtient la formule de la **disparité verticale totale** en fonction des coordonnées angulaires  $\chi$  et  $\varepsilon$  du point  $M_p$  du plan de l'écran :

$$\beta_M = \tan^{-1} \left( \frac{D \times \tan \varepsilon}{\cos \chi \times \sqrt{D^2 + (D \times \tan \chi + EP/2)^2}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{D \times \tan \varepsilon}{\cos \chi \times \sqrt{D^2 + (D \times \tan \chi - EP/2)^2}} \right)$$

avec D en fonction de l'excentricité de M (par rapport à a et b, voir plus haut).

### La disparité du plan de l'écran



**Figure 112 - Représentation des paramètres nécessaires pour le calcul de la disparité verticale du point  $M_p$ .** Les angles d'élévation  $\beta_{dMp}$  et  $\beta_{gMp}$  dans les plans verticaux passant par les axes de visée du point  $M_p$  par les deux yeux (à droite). Dans le plan horizontal passant par les deux yeux (à gauche).

La disparité verticale d'un point  $M_p$  du plan fronto-parallèle est égale à :

$$\beta_{M_p} = \beta_{gM_p} - \beta_{dM_p}$$

On a d'abord :

$$\tan \beta_{gM_p} = \frac{y}{D_{gM_p}} \quad \text{et} \quad \tan \beta_{dM_p} = \frac{y}{D_{dM_p}}$$

D'autre part on a,

$$D_{gM_p}^2 = D_f^2 + (x + EP/2)^2$$

$$D_{dM_p}^2 = D_f^2 + (x - EP/2)^2$$

Enfin, la disparité verticale du point M va donner :

$$\beta_{M_p} = \tan^{-1}\left(\frac{y}{D_{gM_p}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{y}{D_{dM_p}}\right)$$

Et donc, on aura, en fonction des **coordonnées x et y** du point M :

$$\beta_{M_p} = \tan^{-1}\left(\frac{y}{\sqrt{D_f^2 + (x + EP/2)^2}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{y}{\sqrt{D_f^2 + (x - EP/2)^2}}\right)$$

$$y = \frac{\tan \varepsilon \times D_f}{\cos \chi}$$

$$x = D_f \times \cos \chi$$

En coordonnées angulaires  $\chi$  et  $\varepsilon$  :

$$\beta_{M_p} = \tan^{-1}\left(\frac{D_f \times \tan \varepsilon}{\cos \chi \times \sqrt{D_f^2 + (D_f \times \tan \chi + EP/2)^2}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{D_f \times \tan \varepsilon}{\cos \chi \times \sqrt{D_f^2 + (D_f \times \tan \chi - EP/2)^2}}\right)$$

### ***La disparité verticale ajoutée du point M***

A partir de la disparité verticale totale ( $\beta_M$ ) du point M et de la disparité verticale du plan ( $\beta_{M_p}$ ) de l'écran, on va pouvoir obtenir la disparité ajoutée ( $\beta_A$ ) du point M par rapport au plan de l'écran.

$$\beta_A = \beta_M - \beta_{M_p}$$

## Annexe 15 - Calcul des disparités d'un anneau incliné déplacé par rapport au point de fixation.

### Représentation schématique et description

Soit un point M quelconque d'une déformation convexe.

EP est la valeur de l'écart pupillaire de l'observateur,

$D_f$  est la distance de fixation (distance entre le plan du point de fixation et l'observateur).

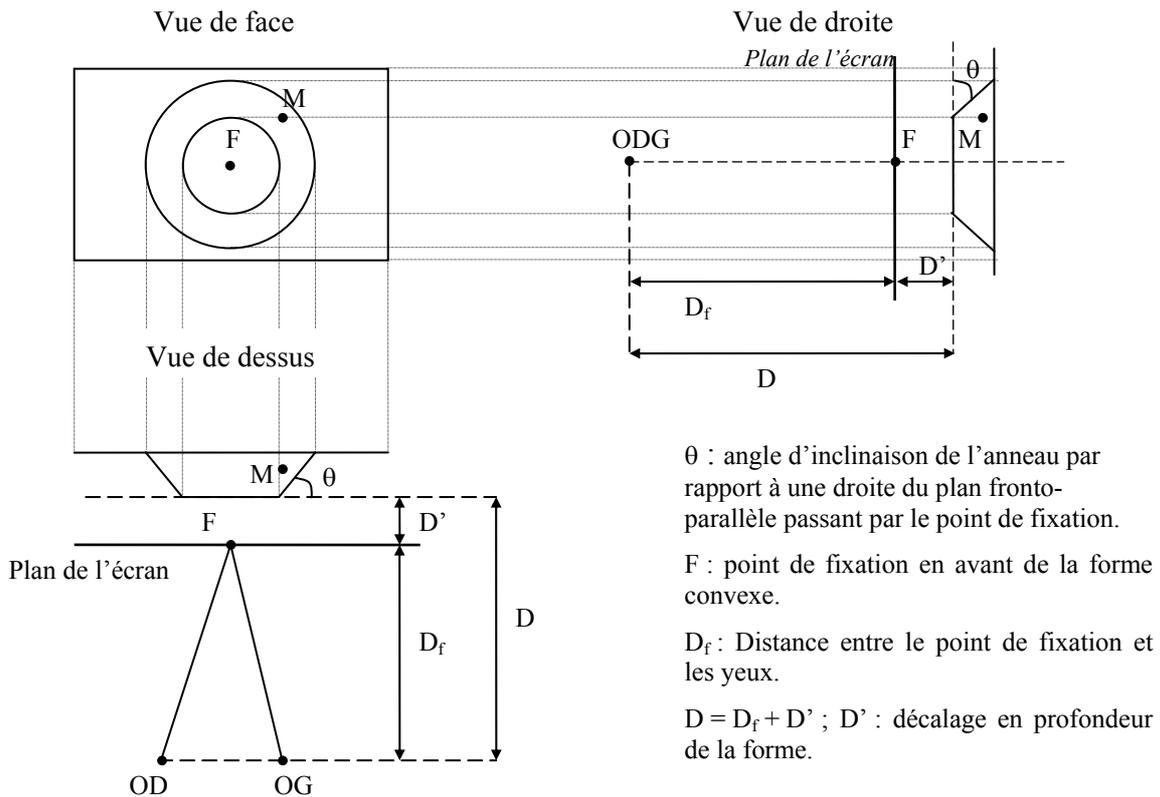
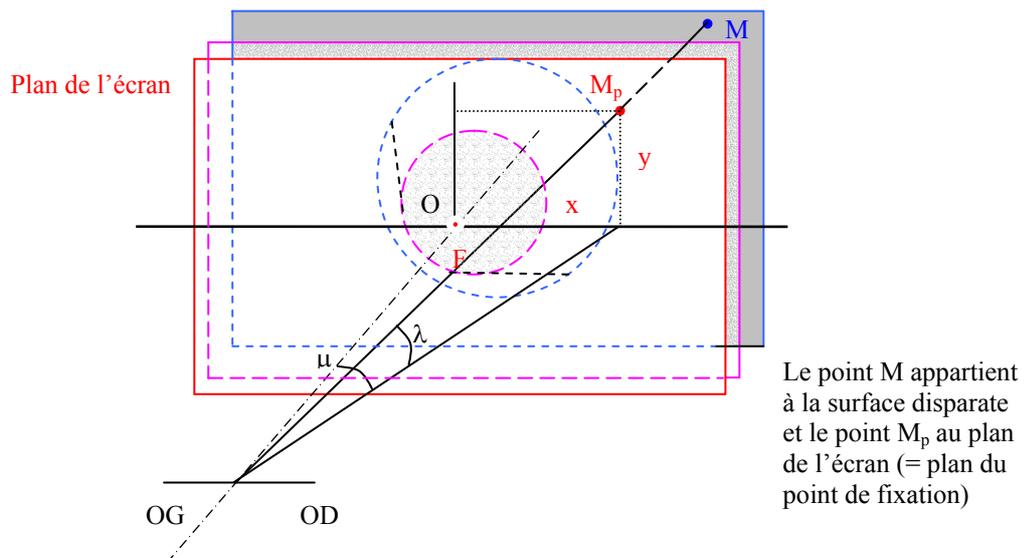


Figure 113 - Vues de face, de droite et de dessus d'une déformation convexe dont le point de fixation F se trouve en avant de la forme convexe, à une distance  $D_f$  de l'axe interoculaire (axe horizontal passant par les deux yeux).

### Description préalable

- Le point de fixation se trouve dans le plan de l'écran.
- On considère une grille de  $1260 \times 960$  mm dans le plan de l'écran. La grille représente le repère des coordonnées (x,y).
- Le centre de la grille a pour coordonnées (0,0). L'axe des x positifs est vers la droite et l'axe des y positifs vers le haut.
- Les nœuds de la grille pour l'axe des abscisses ( $y = 0$ ) sont tous à la distance  $D_f$  du plan vertical contenant l'axe interoculaire.

- La forme concave ou convexe comprend un disque central parallèle au plan de l'écran, l'anneau incliné partant de ce disque et une forme elliptique autour de l'anneau qui est également parallèle au plan de l'écran. Cette forme va se trouver en arrière ou en avant du plan de l'écran (ou plan de fixation). Les points de départ et de fin de l'anneau incliné sont homothétiques par rapport aux points de la forme déterminée dans le plan de l'écran.
- L'angle d'inclinaison  $\theta$  de l'anneau correspond à l'angle entre un plan normal à la courbure de l'anneau et un plan parallèle au plan de l'écran. Un angle d'inclinaison positif indique une pente vers l'arrière.
- Le programme de calcul des images disparates nécessite d'avoir les valeurs de disparité de chaque point de la grille en disparité ajoutée, c'est-à-dire que le programme se base sur un point dans le plan de l'écran auquel il applique des décalages horizontaux et/ou verticaux pour former les images droite et gauche. Les décalages sont calculés en fonction des disparités ajoutées.
- Le système de coordonnées utilisé correspond aux axes longitudinal-azimut / latitudinal-élévation (cf. Annexe 3, Figure 76).
- les coordonnées  $x$  et  $y$  sont celles du point intersection de la ligne de visée binoculaire du point  $M$  avec le plan de l'écran.  $x$  et  $y$  sont donc les coordonnées de  $M_p$  (Figure 114).

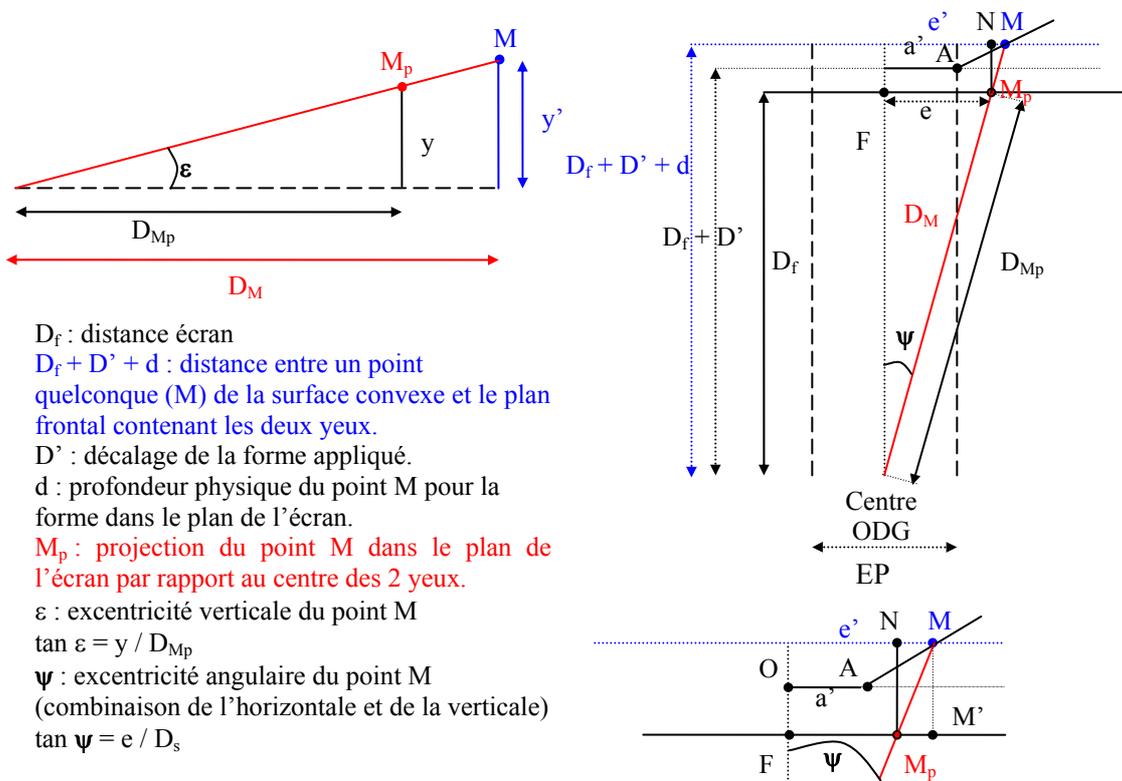


**Figure 114 - Représentation en 3D de la déformation convexe par rapport au plan de l'écran, qui contient le point de fixation, la déformation convexe se trouvant en arrière du plan de l'écran.** Les coordonnées  $x$  et  $y$  dans le plan de l'écran sont ceux du point  $M_p$ , projection du point  $M$  dans le plan de l'écran par rapport au centre des deux yeux.

- La forme souhaitée est celle obtenue avec un gradient de disparité horizontale entre deux excentricités a et b. Dans le plan de l'écran, la disparité horizontale du disque de rayon a est nulle et la disparité horizontale au-delà de b est constante et égale à celle du point b. Cette forme va ensuite être déplacée, par homothétie, en avant ou en arrière du plan de l'écran.

**Distance des points du plan par rapport au couple oculaire**

On calcule la distance de chaque point de la surface convexe par rapport au plan interoculaire (le plan frontal contenant l'axe interoculaire).



**Figure 115 - Vue de dessus (à droite) de la déformation convexe avec l'angle  $\theta$  de la pente de l'anneau entre a et b par rapport au plan fronto-parallèle. Grossissement (à gauche) dans le plan vertical passant par M et le centre des deux yeux, avec l'angle  $\varepsilon$  d'excentricité verticale du point M.**

Nous allons déterminer l'équation permettant de calculer la distance d'un point quelconque M de la surface convexe par rapport au plan frontal contenant l'axe interoculaire. Le point de référence pour le calcul ultérieur des disparités est le point  $M_p$ , projection du point M sur le plan de l'écran par rapport au centre des deux yeux, qui est le plan de fixation. Les coordonnées millimétriques x et y seront donc celles du point  $M_p$ .

Notons que  $D_f$  est la distance de fixation et distance de l'écran ; d la profondeur physique d'un point quelconque M pour une forme 3D dont le disque central est dans le plan

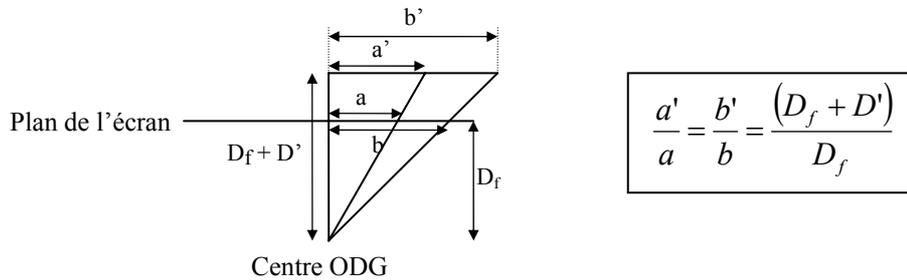
de l'écran ; et  $D'$  est le décalage en profondeur que l'on va appliqué à la forme 3D en avant ou en arrière de l'écran.

$$\cos \psi = \frac{D_f + D' + d}{D_M} = \frac{D_f}{D_{Mp}} \quad D_f + D' + d = D_M \times \cos \psi$$

$$\cos \psi = \frac{M_p N}{M_p M}$$

L'excentricité millimétrique  $e$  du point  $M_p$  vaut :  $e = \sqrt{(x^2 + y^2)}$

L'excentricité  $a'$  correspond à l'excentricité de départ de la variation et l'excentricité  $b'$  l'excentricité de fin de variation, ces deux valeurs d'excentricité sont calculées à partir des valeurs d'excentricité  $a$  et  $b$ , connues dans le plan de l'écran, par homothétie (Figure 116).



**Figure 116 - Représentation et calcul des excentricités millimétriques de départ ( $a$  et  $a'$ ) et de fin ( $b$  et  $b'$ ) de la pente des déformations selon leur position dans le plan de l'écran ou en arrière (dans le cas présent) par homothétie.**

Les points  $M$  d'**excentricité inférieure  $a'$**  se trouvent dans un plan parallèle au plan de l'écran, en avant ou en arrière de ce dernier. La distance  $(D_f + D')$  sera égale pour tous les points de ce disque de rayon  $a$ . La distance de l'écran est connue, nous l'avons nommé  $D_f$ . La distance  $(D_f + D')$  sera également connue, puisque la valeur de  $D'$  (décalage de la forme 3D en profondeur en avant ou en arrière du plan de l'écran) sera choisie au préalable.

*Remarque :* Ceci nous permet de calculer les valeurs de  $a'$  et  $b'$  :

$$a' = \frac{(D_f + D') \times a}{D_f} = a \times \left( 1 + \frac{D'}{D_f} \right)$$

$$b' = \frac{(D_f + D') \times b}{D_f} = b \times \left( 1 + \frac{D'}{D_f} \right)$$

Pour obtenir les distances des autres points au-delà du disque de rayon  $a'$ , nous allons considérer la forme dans le plan de l'écran, permettant ainsi d'obtenir les distance de chacun des points de la forme, auxquelles nous ajouterons le déplacement voulu ( $D'$ ).

NB : dans ces formules, les excentricités  $b$  et  $a$  sont en distance, or dans notre programme elles sont indiquées en angulaire, que l'on définit  $e_a$  et  $e_b$ . De même, l'excentricité  $e$  de chaque

point M lors du balayage de l'image va être calculée à partir des coordonnées angulaires x et y de chaque point. Cette excentricité e en angulaire est notée  $\psi$ .

$$\text{et ainsi : } \tan \psi = \frac{e}{D_f} = \frac{\sqrt{(x^2 + y^2)}}{D_f} \quad \text{ou bien } e = D_f \times \tan \psi$$

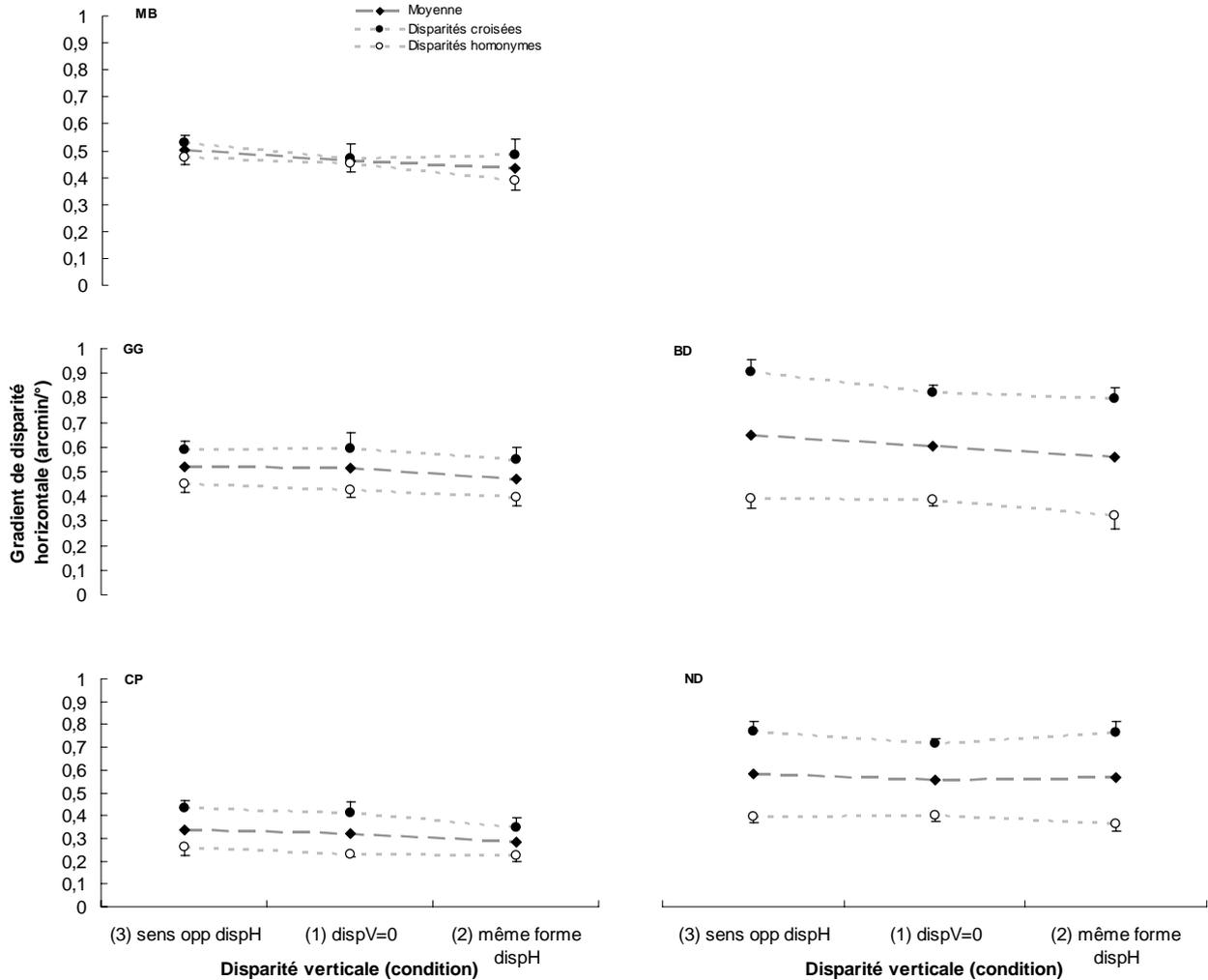
*Remarque* : les coordonnées x et y sont ceux d'un point M dans le plan de l'écran, donc à la distance  $D_f$  de l'observateur.

Notre programme générateur de disparité nécessite de calculer le décalage des deux images en fonction de la disparité horizontale ajoutée (cf. Annexe 7), permettant d'obtenir la distance de chaque point par rapport à l'observateur ( $D_f + d$ ) (cf. Annexe 2).

Dès lors que nous avons la distance de chaque point pour la forme 3D dont le disque central est dans le plan de l'écran, nous pouvons calculer la disparité verticale de la même forme 3D dans un plan différent, en avant ou en arrière de l'écran.

**Annexe 16 - Résultats graphiques de la première étude des disparités verticales pour chaque observateur :** les disparités verticales sont congruentes (2) ou en conflit (3) par rapport aux disparités horizontales. Dans la condition contrôle (1), les disparités verticales sont nulles.

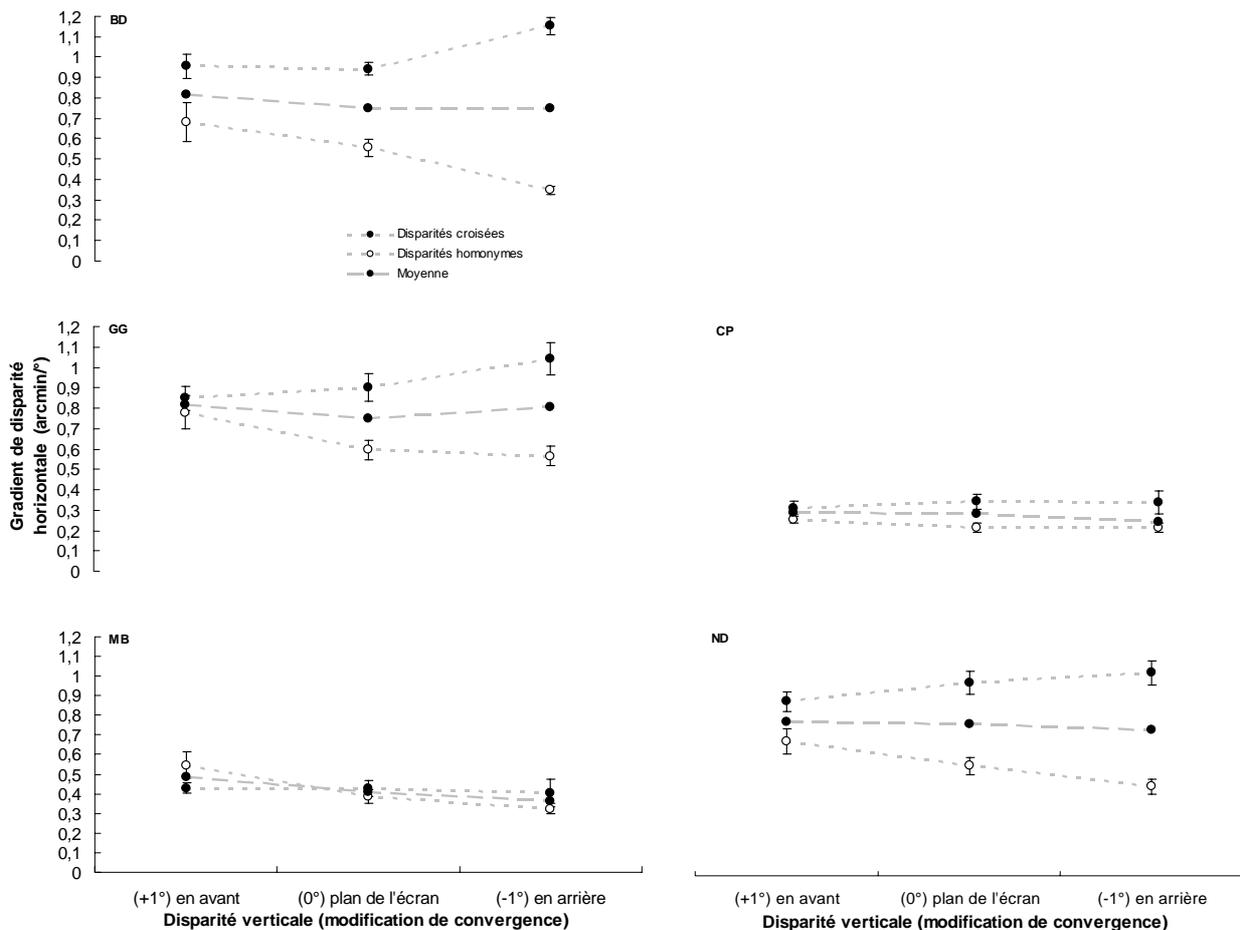
La Figure 117 représente les résultats obtenus pour chaque observateur en gradient de disparité horizontale en fonction de la disparité verticale ajoutée.



**Figure 117 - Représentation des seuils de détection en gradient de disparité horizontale (arcmin/°), pour les disparités croisées et homonymes et la courbe moyenne, et pour chaque observateur, en fonction de la disparité verticale appliquée :** (1) est la condition contrôle sans disparité verticale ; ensuite les disparités verticales correspondant à la forme 3D de la disparité horizontale (condition 2), ou la forme opposée (condition 3).

### Annexe 17 - Analyse de l'influence des disparités verticales, selon le plan pour chaque observateur.

Les variations de seuils en fonction de la disparité verticale introduite pour chaque observateur sont représentées par les graphiques de la Figure 118. Pour les 5 observateurs, on peut noter que les seuils moyens (moyenne des disparités horizontales croisées et homonymes) varient peu en fonction de la disparité verticale. En effet, l'analyse par le test t de Student ne montre effectivement pas de différence significative entre les 3 valeurs de disparité verticale ( $p > 0,05^{47}$ ).



**Figure 118 - Représentation des seuils de détection en gradient de disparité horizontale (arcmin/°), pour les disparités croisées et homonymes et la courbe moyenne, et pour chaque observateur, en fonction de la disparité verticale appliquée : (0°) est la condition contrôle où la disparité verticale est calculée dans le plan de l'écran, elle est congruente avec la disparité horizontale ; (+1°) correspond à une disparité verticale calculée pour un plan en avant de l'écran ; (-1°) la disparité verticale est calculée pour un plan en arrière de l'écran.**

Le Tableau 15 indique les différences significatives des seuils pour chacun des observateurs selon le signe de la disparité horizontale et pour les trois valeurs de disparité verticale introduite. BD présente les résultats qui varient le plus, pour les mêmes

<sup>47</sup> Tests t de Student pour échantillons appariés, observateurs BD, GG, ND, MB et CP : variables comparées : les valeurs pour +1°, 0° et -1° de disparité verticale entre elles.

comparaisons, mais les variations observées pour les disparités croisées et pour les disparités homonymes sont de sens opposé : les seuils pour une disparité verticale en arrière du plan de l'écran sont plus importants en disparités croisées et plus faibles en disparités homonymes que les seuils pour les disparités verticales dans le plan de l'écran ou en avant. On observe des résultats semblables pour GG et CP : en disparités croisées, les seuils sont différents pour les disparités verticales des plans extrêmes (en avant et en arrière de l'écran), ils sont supérieurs en arrière ; en disparités homonymes, les seuils sont différents entre les disparités verticales dans le plan de l'écran et celles en avant où ils sont supérieurs.

Observateurs	Disparités horizontales croisées			Disparités horizontales homonymes		
	Disparités verticales comparées		Test t de Student	Disparités verticales comparées		Test t de Student
BD	0°	-1°	p = 0,0013	0°	-1°	p = 0,0005
	+1°	-1°	p = 0,0024	+1°	-1°	p = 0,01
CP	+1°	-1°	p = 0,02	0°	+1°	p = 0,024
GG	+1°	-1°	p = 0,024	0°	+1°	p = 0,03
MB	/	/	/	+1°	-1°	p = 0,01
ND	/	/	/	+1°	-1°	p = 0,004

**Tableau 15 - Récapitulatif des résultats significatifs ( $p < 0,05$ ) au test t de Student pour échantillons appariés réalisés pour chaque observateur, selon le signe de la disparité horizontale (croisée ou homonyme) entre les 3 valeurs des disparités verticales (+1°, 0° et -1°).**

Enfin, les observateurs MB et ND se comportent de façon similaire également : Une variation significative est observée uniquement en disparités homonymes et elle concerne les seuils de disparités verticales en avant et en arrière de l'écran qui sont inférieurs en arrière.

## Annexe 18 - Résultats de l'analyse des disparités de plusieurs couples de verres optiques unifocaux.

Type de correction	Puissance		Disparités horizontales				Disparités verticales	
	OD	OG	Signe	Valeur maximale gradient (70°x90°) (arcmin/°)	Coefficient Gradient/ exc	Valeur maximale gradient (7-14°) (arcmin/°)	Signe / disparités horizontales	Valeur maximale (70°x90°) (arcmin)
Isométrie sphérique	-2,00	-2,00	homonymes	0.013	< Seuil	0.00054	congruent	3.54
	+2,00	+2,00	croisées	0.021	< Seuil	0.00029	congruent	6.96
	+4,00	+4,00	croisées	0.046	< Seuil	0.0006	congruent	17.35
Astigmatisme	-2,00(+1,00)90°	-2,00(+1,00)90°	homonymes	0.0078	< Seuil	0.00031	congruent	2.06
	-2,00(+1,00)0°	-2,00(+1,00)0°	homonymes	0.0078	< Seuil	0.0001	congruent	2.52
	-2,00(+1,00)45°	-2,00(+1,00)135°	sup : croisées inf : homonymes	0.092	< Seuil	0.0033	conflit	46.98
Galbe	+2,00	+2,00	homonymes	0.39	> seuil à partir de 50° d'exc	0.0022	conflit	28.79
Anisométrie	+2,00	+4,00	gauche : homonymes droit : croisées	0.583	> seuil à partir de 50° d'exc	0.012	conflit	132.44

**Tableau 16 - Résumé des valeurs de disparités binoculaires calculées pour plusieurs couples de verres :** pour les disparités horizontales, le tableau indique leur signe (croisées ou homonymes) et les valeurs maximales du gradient sur l'ensemble de l'ellipse de 70° par 90°, et dans l'anneau compris entre 7 et 14° d'excentricité ; pour les disparités verticales, est indiqué leur signe par rapport aux disparités horizontales (congruent ou en conflit) et leur valeur maximale dans l'ellipse de 70°x90°.