

**THÈSE DE DOCTORAT**  
**Immersion Visuelle Hyper-Réaliste et**  
**Multi-Sensorielle 3D**

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Table des figures</b>	<b>iv</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>vi</b>
<b>I Partie expérimentale : contraste et luminance</b>	<b>1</b>
<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>1 Modèles de Rea</b>	<b>3</b>
1.1 Première modélisation de la performance visuelle relative . . . . .	3
1.1.1 Modèle précurseur . . . . .	3
1.1.2 Application à la performance visuelle . . . . .	4
1.2 Méthode des temps de réaction . . . . .	5
1.2.1 Protocole expérimental . . . . .	5
1.2.2 Calcul des temps de réaction théoriques . . . . .	7
<b>2 Mesures préliminaires</b>	<b>8</b>

2.1	Luminance globale (luminance de fond) . . . . .	8
2.2	Luminance de la cible (luminance de tache) . . . . .	10
2.3	Diamètre pupillaire . . . . .	11
2.4	Absorption des verres des lunettes 3D . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Protocole expérimental</b>	<b>17</b>
3.1	Dispositif . . . . .	17
3.1.1	Hypothèses de travail . . . . .	17
3.1.2	Sujets & matériel . . . . .	18
3.1.3	Tâche à effectuer . . . . .	19
3.2	Choix des conditions expérimentales . . . . .	20
3.2.1	Luminance . . . . .	20
3.2.2	Contraste . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Résultats</b>	<b>25</b>
4.1	Prédictions du modèle théorique . . . . .	25
4.2	Mesures réelles . . . . .	25
4.3	Analyse et discussion . . . . .	28
	<b>Conclusion</b>	<b>30</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>31</b>
	<b>ANNEXES</b>	<b>B</b>
	<b>Calcul de la performance visuelle, méthode des temps de réaction</b>	<b>B</b>
	<b>Luminance de fond</b>	<b>E</b>

# TABLE DES FIGURES

1.1	Illustration de l'effet de compression. Image tirée de [Naka & Rushton, 1966]	4
1.2	Installation de l'expérimentation de Rea et Ouellette. Image tirée de [Rea & Ouellette, 1988]	6
2.1	Chromameter CS100	9
2.2	Evolution de la luminance en fonction du niveau de gris sur les cinq points de mesure et leur moyenne.	10
2.3	Luminance de la cible en fonction de la luminance globale	12
2.4	Oculomètre Dikablis Professional	12
2.5	Exemple d'une mesure en pixel de largeur pupillaire au cours du temps.	13
2.6	Mesures pour la conversion pixel/mm.	14
2.7	Comparaison entre les mesures de diamètre pupillaire par rapport aux valeurs théoriques fonction de la luminance affichée.	15
2.8	Comparaison des mesures sans et avec filtre des lunettes stéréoscopiques.	15
2.9	Pourcentage d'absorption en fonction du niveau de gris affiché.	16
3.1	Répartitions des sujets pour les expérimentation de contraste/luminance et de comparaison objective/subjective.	18

3.2	Déroulement global de l'expérimentation contraste/lumimance. . . . .	20
3.3	Déroulement d'une session de mesure de temps de réactions pour une lumimance de fond donnée. . . . .	21
4.1	Performance théorique et réelle pour l'expérimentation de détection des stimuli contrastés, conditions 0 et 32. . . . .	27
4.2	Performance théorique et réelle pour l'expérimentation de détection des stimuli contrastés, conditions 80 et 128. . . . .	27
4.3	Performance théorique et réelle pour l'expérimentation de détection des stimuli contrastés, conditions 176 et 255. . . . .	27

# LISTE DES TABLEAUX

2.1	Extrait des mesures de luminance globale du simulateur en fonction de la nuance de gris affichée. . . . .	9
2.2	Extrait des mesures de luminance du disque en fonction de sa nuance de gris et de la nuance globale affichée. . . . .	11
2.3	Mesure pupillaires en fonction de la luminosité . . . . .	14
3.1	Valeurs des nuances de gris du stimulus nécessaire pour afficher un contraste par valeur supérieur désiré. . . . .	24
3.2	Valeurs des nuances de gris du stimulus nécessaire pour afficher un contraste par valeur supérieur désiré. . . . .	24
4.1	Temps de réaction théoriques (en ms) prédits par le modèle de Rea et Ouellette. 26	
4.2	Temps de réaction moyens réels (en ms) mesurés pendant l'expérimentation et leurs écart-types moyens. . . . .	28
1	Luminance globale du simulateur en fonction de la nuance de gris affichée. .	E
2	Luminance de la cible (en $cd/m^2$ ) en fonction de sa nuance de gris et de la nuance de gris du fond. . . . .	F

## **Première partie**

# **Partie expérimentale : contraste et luminance**

# INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, on a décrit deux approches possibles pour le critère de contraste et de luminance : les fonctions de sensibilité au contraste et la performance visuelle relative. Si les premières sont assez limitées, notamment car elles ne déterminent qu'un seuil à partir duquel un élément devient visible et non pas sa visibilité en fonction des conditions d'illumination, le concept de performance visuelle est intéressant. On en a présenté les deux principales modélisations : le modèle de Blackwell et de la CIE [Blackwell & Blackwell, 1971], puissant mais hermétique, et le modèle de Rea et ses évolutions [Rea, 1986]. On a également pointé le fait que ces modèles, bien qu'intéressants, n'étaient pas à l'origine conçus pour la réalité virtuelle et nécessitaient donc une vérification expérimentale.

Il a été nécessaire de choisir entre les deux modèles, celui de Rea et celui de la CIE/Blackwell. Le modèle de Blackwell semble plus complet avec une portée d'action comprise en 1 et  $10000\text{ cd/m}^2$  et un calcul basé sur trois processus de vision, décrits comme principaux, impliqués dans la reconnaissance des détails de la tâche à effectuer, dans le maintien des yeux en position fixe pendant les périodes de fixation, et enfin, dans la réalisation de mouvements rapide des yeux (les saccades). Néanmoins, le modèle de la CIE est une boîte noire générée à partir de la mise en commun des travaux d'un certain nombre de chercheurs. Il n'existe pas d'expérimentation détaillée qui puisse être refaite, et à fortiori, encore moins en réalité virtuelle.

De l'autre côté, le modèle de Rea est plus limité en portée (entre 12 et  $169\text{ cd/m}^2$ ) mais présente en détail tout le protocole qui a été mis en œuvre pour développer les équations de performance visuelle. De plus, l'intervalle de fonctionnement du modèle correspond relativement bien aux luminances atteignables dans un simulateur et n'est donc pas très contraignant.

L'objectif de cette partie est donc de vérifier par l'expérimentation, dans un simulateur, les prédictions de performance du modèle de Rea. Pour ce faire, on a transposé en réalité virtuelle l'une des expérimentations mise en place par Rea et Ouellette pour déterminer leur modèle.



## CHAPITRE

# 1

## MODÈLES DE REA

### 1.1 Première modélisation de la performance visuelle relative

Les sections suivantes décrivent brièvement le contexte et les premiers travaux de Rea qui l'ont mené à proposer sa propre modélisation de la performance visuelle [Rea, 1987, 1986], définie comme étant la vitesse et la précision atteintes pendant la réalisation d'une tâche visuelle.

#### 1.1.1 Modèle précurseur

Le premier modèle de Rea est directement inspiré de l'effet de compression proposé par [Naka & Rushton, 1966] qui modélise qu'à partir d'un certain niveau d'intensité, lorsque l'intensité du stimulus augmente la réponse sensorielle associée augmente de moins en moins jusqu'à atteindre une forme de plateau (Fig. 1.1) Les différentes courbes représentent les longueurs d'onde des lumières de couleur utilisées. Cet effet est modélisé de la manière suivante :  $\frac{R}{R_{max}} = \frac{I^n}{I^n + k^n}$ .

Dans cette équation, le rapport de la réponse sensorielle ( $R$ ) sur la réponse sensorielle maximale ( $R_{max}$ ) est égal au rapport de l'intensité  $I$  montée à une puissance  $n$  déterminée sur la somme de cette même intensité  $I$  montée à la puissance  $n$  et d'une intensité  $k$ , également montée à la puissance  $n$ , telle que la réponse à l'intensité  $k$  est égale à la moitié de la réponse sensorielle maximale :  $R(k) = \frac{R_{max}}{2}$ .

On peut faire l'analogie suivante pour donner un bon exemple de l'effet de compression : si dans une pièce on allume une deuxième ampoule d'égale intensité, la sensation de lumi-

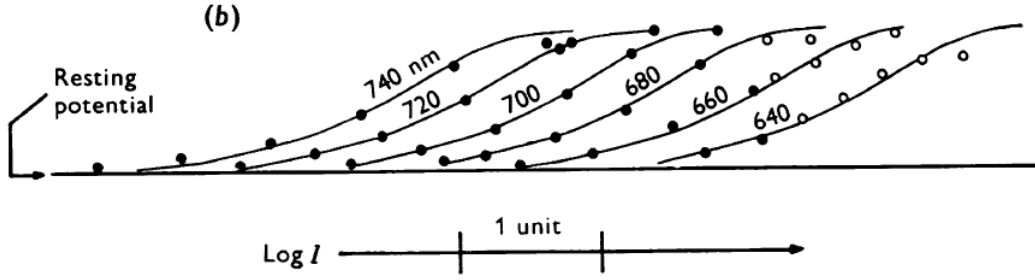


FIGURE 1.1 – Illustration de l'effet de compression. Image tirée de [Naka & Rushton, 1966]

nosité va grandement augmenter. Au contraire, si on rajoute une ampoule dans une pièce dans laquelle déjà mille ampoules sont allumées, la différence de luminosité perçue sera minime.

### 1.1.2 Application à la performance visuelle

Rea s'est imposé deux règles pour la conception de son modèle : la performance visuelle doit être issue d'une performance à la réalisation d'une tâche et le modèle doit être cohérent avec la littérature, notamment avec l'effet de compression que l'on vient de décrire.

Le stimulus est décrit (Eq. 1.3) comme la différence entre le seuil de contraste  $C_t$ , calculé avec la formule de Blackwell (Eq. 1.1), qui représente le contraste minimal à partir duquel la perception devient possible en fonction de la luminosité du fond ( $L_B$ ) et le contraste visuel  $C_V$  qui correspond au contraste entre la luminosité du fond et la luminosité de la tâche visuelle (Eq. 1.1).

$$C_t = 0.048 \left[ \left( \frac{0.308}{L_B} \right)^{0.4} + 1.0 \right]^{2.5} \quad (1.1)$$

$$C_V = \frac{L_B - L_T}{L_B} \quad (1.2)$$

$$\Delta C = C_V - C_t \quad (1.3)$$

Les calculs suivants sont ensuite tirés de régressions polynomiales de degré 2 faites avec leurs données expérimentales :

$$\begin{cases} n = 0.882 + 4.38\theta_1 - 6.05\theta_1^2 \\ \theta_1 = \log(\log(L_B)) \end{cases} \quad (1.4)$$

$$\begin{cases} k = -2.25 + 1.77\theta_2 - 0.217\theta_2^2 \\ \theta_2 = \log(L_B) \end{cases} \quad (1.5)$$

$$VP_{max} = 0.0628 + 0.0120\theta_2 - 0.00268\theta_2^2 \quad (1.6)$$

Au final, la performance visuelle s'écrit de la manière suivante (Eq. 1.7) :

$$VP = \frac{(\Delta C)^n}{(\Delta C)^n + (k/L_B)^n} \quad (1.7)$$

Et  $RVP = \frac{VP}{f}$  avec  $f$  la valeur de  $VP_{max}$  dans les meilleurs conditions (luminance et contraste maximaux). Dans le cas de l'expérimentation de Rea,  $f = 0.076$ .

Les résultats de cette expérimentation permettent à l'auteur de dégager trois tendances :

- A contraste constant, la performance augmente avec la luminance,
- La performance augmente plus rapidement avec le contraste lorsque les conditions de luminance sont plus élevées,
- La performance varie assez peu entre des conditions moyenne et supérieure de contraste.

## 1.2 Méthode des temps de réaction

Rea et Ouellette complètent la démarche initiale de Rea en proposant une méthode pour établir la performance visuelle d'un sujet, basée sur la mesure et la prédiction des temps de réaction de ce dernier à l'apparition d'un stimulus visuel calibré [Rea & Ouellette, 1988, 1991]. C'est cette modélisation que l'on va chercher à traduire en réalité virtuelle afin de déterminer si elle est utilisable dans le cadre de notre score de réalisme, pour le critère de contraste et de luminance.

### 1.2.1 Protocole expérimental

L'objectif était de mesurer le temps de réaction des sujets à l'apparition d'une cible sur un écran. La couleur de la cible était calibrée pour obtenir un contraste choisi par rapport au fond sur lequel elle était affichée (l'écran, en l'occurrence).

L'expérimentation était découpée en deux parties : une première série de mesures pour des cibles plus foncées que le fond sur lequel elles étaient présentées (méthode décrémentationale) puis une autre série de mesures avec des cibles plus claires que le fond de présentation (méthode incrémentale).

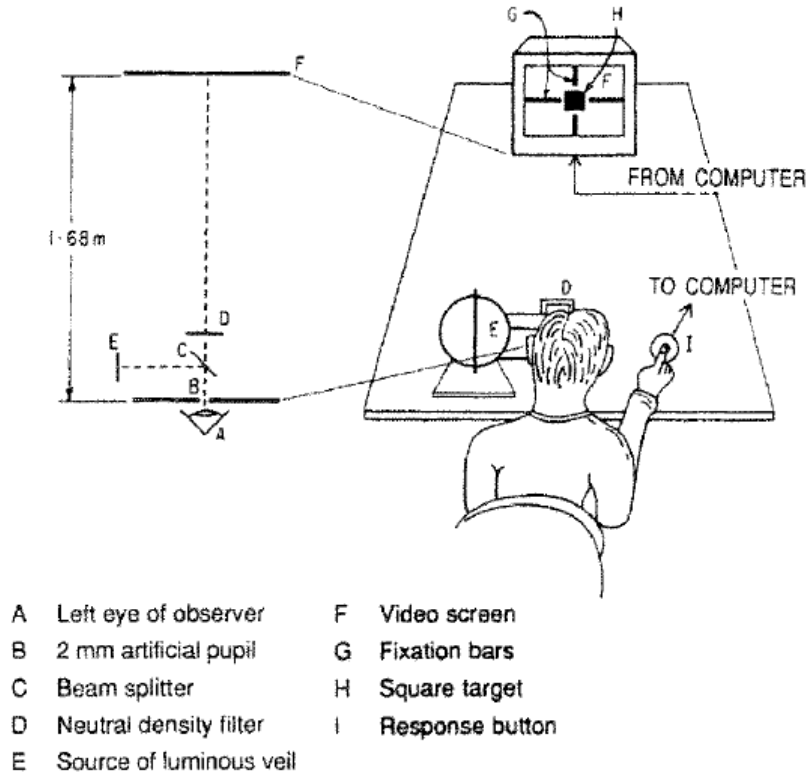


FIGURE 1.2 – Installation de l'expérimentation de Rea et Ouellette. Image tirée de [Rea & Ouellette, 1988]

Les cibles, un carré, étaient présentées à 1.68 m de l'œil du sujet sur un écran occupant 12 *degrs* de champ de vision horizontal et 7 *degr* de champ de vision vertical. Toutes les cibles étaient vues avec l'œil gauche, à travers un filtre neutre réglable et avec l'ajout d'une voile lumineuse artificiel directement au niveau de l'œil (Fig. 1.2).

Le contraste du carré était calculé en utilisant l'équation suivante (Eq. 1.8) :

$$C = \frac{|(TL_b + L_v) - (TL_t + L_v)|}{TL_b + L_v} = \frac{T|L_b - L_t|}{L_a} \quad (1.8)$$

Avec  $T$  la valeur de transmittance du filtre (entre 0 et 1),  $L_b$  la luminance du fond de l'écran,  $L_t$  la luminance du carré à détecter et  $L_v$  la luminance de voile ajoutée artificiellement.  $L_a$  représente quand à elle la valeur de la luminance d'adaptation, c'est à dire la valeur pour laquelle l'œil et tout le système optique se sont réglés (avec par exemple l'adaptation du diamètre pupillaire).

Chaque apparition de cible était espacée d'une temporisation de 1.5 *seconde* puis d'une temporisation aléatoire variant entre 1 et 3 secondes. La taille de la tache visuelle était variable entre 0.20 et  $280 \times 10^{-5}$  *steradians*.

Chaque sujet a enregistré 19200 mesures de temps de réaction pour la partie décroissante et 3625 mesures pour la partie incrémentale.

## 1.2.2 Calcul des temps de réaction théoriques

Une fois toutes les mesures effectuées, cela a permis de rétablir une équation de performance avec une protocole similaire à la première modélisation et décrit plus haut. Le détail de ces calculs est présenté en annexes et on retiendra ici seulement l'équation suivante (Eq. 1.9) :

$$R = \frac{(\Delta C_d)^{0.97}}{(\Delta C_d)^{0.97} + K^{0.97}} \quad (1.9)$$

De cette équation qui décrit la performance du sujet à détecter l'apparition de la tache visuelle en fonction des conditions d'illumination et de contraste, on dérive le temps de réaction en prenant simplement l'inverse de la performance (Eq. 1.10) :

$$RT = \frac{1}{R} \quad (1.10)$$

Cela permet d'avoir un comportement logique dans les résultats avec un temps de réaction qui diminue quand la performance augmente et inversement.

De plus, cette performance  $R$  liée au temps de réaction, ainsi calculée, peut être reliée au modèle initial de performance visuelle relative. Cela nécessite d'appliquer deux opérations sur l'ensemble des résultats mesurés dans les deux expérimentation pour les mêmes conditions d'illumination, de contraste et de taille de cible : le calcul de  $\Delta T_{vis}$  : la variation du temps de réaction par rapport au temps obtenu dans les meilleures conditions expérimentales (Eq. 1.11) et vient ensuite une transformation linéaire (Eq. 1.12) :

$$\Delta T_{vis} = RT_{ref} - RT \quad (1.11)$$

$$RVP = RVP' \left( \frac{\Delta T_{vis} - \Delta T_{vis,r}}{\Delta T'_{vis} - \Delta T_{vis,r}} \right) \quad (1.12)$$

Avec  $RT_{ref}$  le temps de réaction « étalon » obtenu dans les meilleures conditions expérimentales,  $RVP'$  la valeur maximale de performance visuelle pour le jeu commun de conditions expérimentales,  $\Delta T'_{vis}$  la meilleure valeur pour le jeu commun et enfin  $\Delta T_{vis,r}$  l'estimation de  $\Delta T_{vis}$  au seuil de contraste de lisibilité.

On sait donc désormais calculer la performance théorique et donc les temps de réaction théoriques à l'apparition d'une tache visuelle en fonction des conditions de luminance, de contraste et de taille de la cible. Il reste donc à mesurer empiriquement nos propres temps de réactions pour les comparer.

## CHAPITRE

# 2

## MESURES PRÉLIMINAIRES

Afin de contrôler le plus finement possible les valeurs de luminance et de contraste proposées aux sujets pendant les expérimentations, il est nécessaire de mesurer avec le plus grand soin, directement sur le simulateur, toutes ces valeurs. Les mesures ont été faites dans les conditions de l'expérimentation avec un « chromameter CS-100 » (Fig. 2.1).

### 2.1 Luminance globale (luminance de fond)

La première étape est de mesurer la luminance globale du simulateur, toutes faces allumées. Dans notre expérimentation, le simulateur sert à la fois de support pour afficher les cibles visuelles à percevoir et à la fois de source principale de lumière, toutes autre lampe dans la pièce étant éteinte. La luminance globale de l'expérimentation est donc la luminance des écrans, que l'on appellera ici « luminance de fond » pour les calculs de contraste, les cibles étant affichées directement sur une couleur uniforme sur l'écran.

Même si il existe des manières théoriques de convertir une couleur et son code RGB associé en une luminance générée par l'écran, il est nécessaire pour nous de mesurer cette transformation. En effet, il existe un certain nombre de biais tels que l'influence des autres écrans sur l'écran mesuré, l'influence des sources mineures de lumière, la fatigue de la lampe du projecteur, la dégradation de l'écran. En mesurant la relation couleur luminance générée directement dans le simulateur, on se débarrasse de tous ces biais et on peut viser la fonction de transfert réelle.

On effectue l'intégralité de nos mesures sur la face avant du simulateur car l'expérimentation ne se déroulera que sur cette face. Néanmoins, toutes les autres faces du simulateur sont éclairées, comme dans les conditions expérimentale, afin de prendre en compte l'influence de la luminosité des faces latérales et de la face au sol sur la luminosité de la face



FIGURE 2.1 – Chromameter CS100

avant. On utilise cinq points de mesure sur la face avant (répartis à la manière d'un dé à 6 faces), chaque mesure par point étant triplée pour éviter tout effet indésirable.

Les mesures ne sont faites que sur des nuances de gris. Pour ce faire, on affiche des couleurs dont les composantes R, G et B sont égales. Dans le simulateur, la couleur étant codée sur 8 bits, on peut afficher 256 nuances différentes : du noir le plus « pur » (Code RGB : (0, 0, 0)) au blanc le plus « pur » (Code RGB : (255, 255, 255)). Néanmoins, par soucis de praticité, on se limite à 17 nuances de gris en faisant des incréments de 16 en 16 dans le codage RGB des couleurs affichées. Par la suite, comme les trois composantes R, G et B sont toujours égales, on parlera de « niveau de gris » on se référant directement à la valeur des composantes. Par exemple, le noir sera appelé « gris 0 » étant donné que c'est une nuance de gris et que ses trois composantes R, G et B sont égales à 0.

Un extrait des résultats de mesure est disponible en Table 2.1, l'ensemble des mesures, détaillé par point de mesure, est disponible en annexes.

TABLE 2.1 – Extrait des mesures de luminance globale du simulateur en fonction de la nuance de gris affichée.

Couleur affichée	Niveau de gris	Moyenne
Noir	0	0.07 $cd/m^2$
Gris sombre	80	3.73 $cd/m^2$
Gris clair	176	23.22 $cd/m^2$
Blanc	255	42.82 $cd/m^2$

On peut alors ensuite tracer le graphe représentant l'évolution de la luminance globale du simulateur en fonction du niveau de gris affiché sur toutes ses faces (Fig. 2.2). De cette courbe, on déduit alors une régression polynomiale d'ordre 3 ( $R^2 = 1$ ) qui nous donne la relation mathématique (Eq. 2.1) permettant d'anticiper la luminance en fonction du niveau de gris. Cela nous permettra par la suite le choisir précisément les couleurs à afficher pour obtenir le contraste désiré. Avec  $L_G$  la luminance globale du simulateur et  $g$  le niveau de

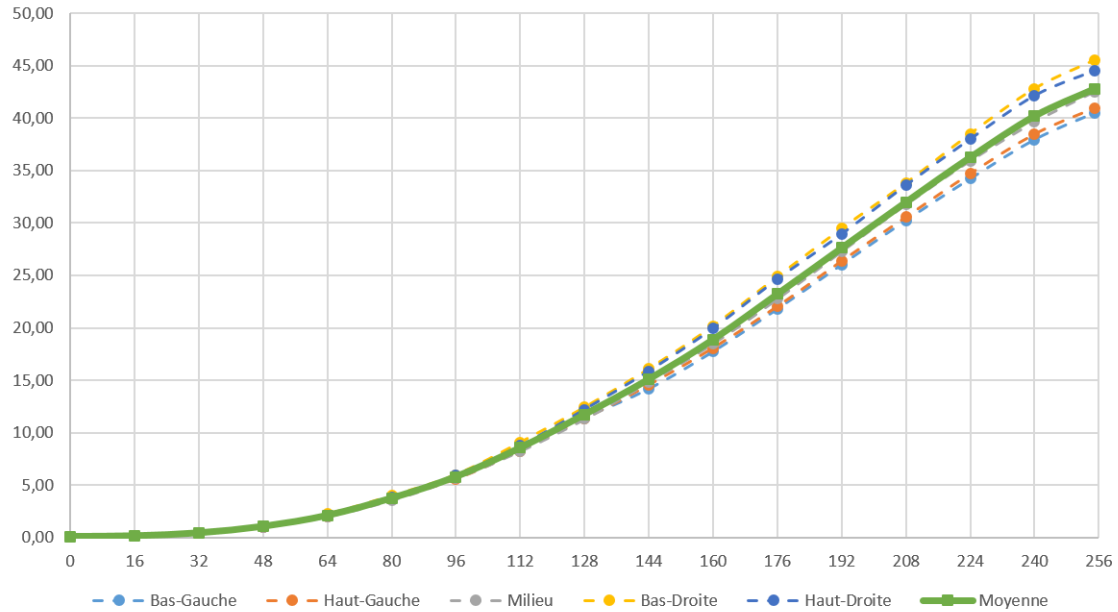


FIGURE 2.2 – Evolution de la luminance en fonction du niveau de gris sur les cinq points de mesure et leur moyenne.

gris normalisé, c'est à dire variant de 0 (= 0/255) à 1 (= 255/255).

$$L_G(g) = 0.69 - 18.37 g + 102.08 g^2 - 40.78 g^3 \quad (2.1)$$

## 2.2 Luminance de la cible (luminance de tache)

De la même manière, on réalise ensuite une série de mesures avec, en plus de l'intégralité des faces affichant un niveau de gris uni, un petit disque d'un diamètre de 3 cm, au centre de la face avant, dans une nuance de gris différente du fond. Cette cible sera la tache visuelle à détecter pour les sujets de l'expérimentation. Il est donc nécessaire de connaître également son évolution en luminance en fonction de son niveau de gris, le tout en fonction du niveau de gris du reste des écrans du simulateur qui vont très certainement influencer.

On limite cette fois à 6 le nombre de conditions de niveau de gris pour le reste des écrans (les 6 niveaux qui ont été retenus pour l'expérimentation) tout en gardant l'incrément de 16 par 16 pour les niveaux de gris du disque. A cause de la taille de la cible à mesurer par rapport à la surface totale des écrans, on fait l'hypothèse que celle-ci ne perturbera pas la luminance globale tandis que le niveau de gris global influera sur la luminance du disque. De même, on ne réalise qu'une seule mesure au centre du disque, triplée encore une fois.

On présente un extrait des résultats des mesures en Table 2.2. L'ensemble des mesures est également disponible en annexes.



TABLE 2.2 – Extrait des mesures de luminance du disque en fonction de sa nuance de gris et de la nuance globale affichée.

Nuance de la cible	Fond : 0	Fond : 128	Fond : 255
0	0.06 $cd/m^2$	5.51 $cd/m^2$	20.30 $cd/m^2$
64	1.13 $cd/m^2$	6.55 $cd/m^2$	21.40 $cd/m^2$
144	8.20 $cd/m^2$	13.57 $cd/m^2$	28.40 $cd/m^2$
255	23.37 $cd/m^2$	28.77 $cd/m^2$	43.40 $cd/m^2$

On s'aperçoit que l'influence du niveau de gris du reste des écrans est très grand sur la luminance de la cible au centre de l'écran principal avec par exemple une multiplication par quasiment 300 de la luminance d'un cible noire (gris 0) sur fond noir (gris 0) par rapport à une cible noire (gris 0) sur fond blanc (gris 255).

On peut alors ensuite tracer les graphes représentant les évolutions de la luminance du disque en fonction du niveau de son niveau de gris et de celui affiché sur toutes ses faces (Fig. 2.3). De ces courbes, on déduit les fonctions de transfert par régression polynomiale d'ordre 3 ( $R^2 = 1$ ) (Eq. 2.2). Avec  $L_{T,p}$  la luminance du disque sur la face avant du simulateur et  $g$  le niveau de gris normalisé de la cible et  $p$  celui du reste des écrans.

$$\begin{cases} L_{T,0}(g) = 0.44 - 10.67 g + 56.44 g^2 - 22.37 g^3 \\ L_{T,32}(g) = 0.60 - 10.67 g + 56.33 g^2 - 22.25 g^3 \\ L_{T,80}(g) = 2.11 - 10.87 g + 59.90 g^2 - 22.64 g^3 \\ L_{T,128}(g) = 5.89 - 10.74 g + 56.29 g^2 - 22.24 g^3 \\ L_{T,176}(g) = 11.45 - 10.33 g + 54.77 g^2 - 21.11 g^3 \\ L_{T,255}(g) = 20.69 - 10.85 g + 57.24 g^2 - 23.21 g^3 \end{cases} \quad (2.2)$$

## 2.3 Diamètre pupillaire

L'objectif était de vérifier une hypothèse : la luminance mesurée sur les écrans est égale à la luminance d'adaptation. Pour ce faire, toutes les mesures précédentes ont été faites par une personne équipée d'un oculomètre commercialisé par la société Ergoneers, le Dikablis Professional<sup>1</sup> (Fig. 2.4). Si on arrive à récupérer le diamètre pupillaire réel, mesuré en temps réel sur l'opérateur des mesures, on pourra, via la littérature et notamment la formule de Weale (Eq. 2.3) remonter à la luminance d'adaptation qui provoque ce diamètre pupillaire. On pourra alors la comparer à la luminance mesurée sur nos écrans et discuter notre hypothèse.

$$2r = 4.77 - 2.44 \tanh[0.3 \log_{10}(L_a)] \quad (2.3)$$

---

1. <https://lc.cx/dgLn>

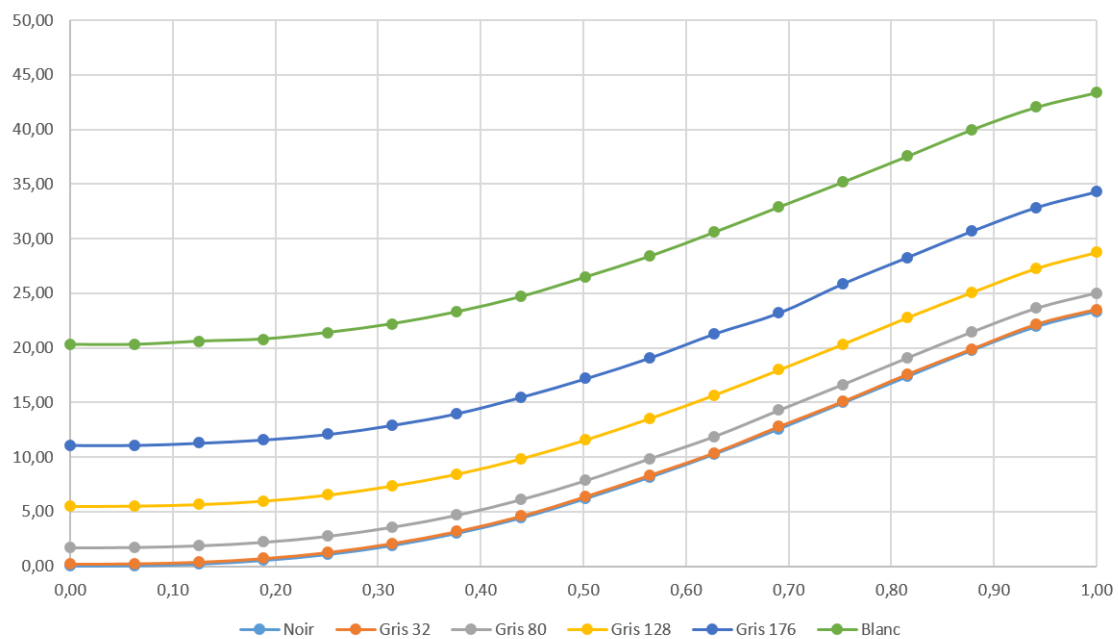


FIGURE 2.3 – Luminance de la cible en fonction de la luminance globale



FIGURE 2.4 – Oculomètre Dikablis Professional

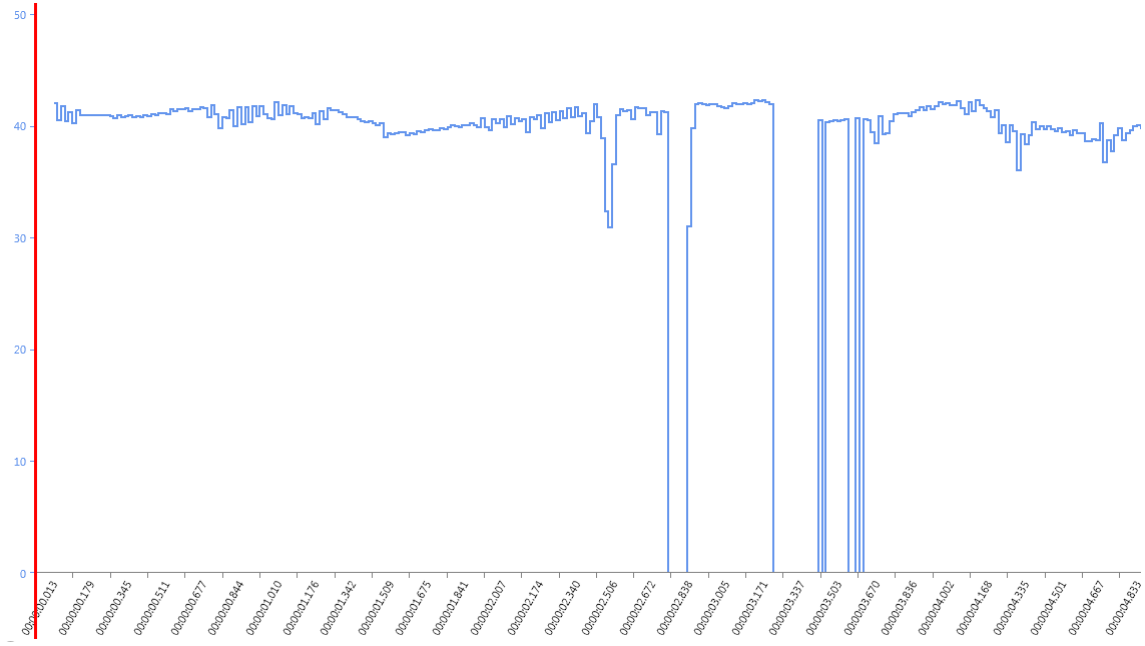


FIGURE 2.5 – Exemple d’une mesure en pixel de largeur pupillaire au cours du temps.

L’oculomètre filme les yeux dans le cadre de son fonctionnement et permet donc de relever parallèlement un certain nombre d’autres paramètres en temps réel et sur les deux yeux indépendamment. Notamment, la surface, la hauteur et la largeur pupillaire peuvent être mesurées. La Fig. 2.5 représente une mesure de largeur pupillaire au cours du temps. Les pics correspondent à un clignement des yeux. Malheureusement, ces mesures sont données en pixels et non pas directement en mm. Il faut donc faire une conversion par rapport à une référence connue (en millimètres) dans l’image.

On prend le diamètre du globe oculaire comme référence car sa taille est globalement constante (Fig. 2.6). Sur l’opérateur des mesures, cette valeur était de 25 mm. En mesurant ensuite directement sur une image, qu’on prend comme référence, la largeur de l’œil (mesure de référence) et le diamètre de la pupille on peut obtenir un ratio transformant une taille mesurée en pixel par le logiciel en millimètres réels (Eq. 2.4).

$$r = \frac{\text{diam oculaire mesure réelle (mm)} \times \text{diam pupillaire image ref (mm)}}{\text{diam oculaire image ref (mm)} \times \text{diam pupillaire image ref (px)}} \quad (2.4)$$

De même que précédemment, on prend des mesures dans cinq conditions de luminosité : condition de luminosité maximale, condition minimale et trois conditions intermédiaires. Les mesures sont disponibles dans en Table 2.3 et sur la Fig. 2.7.

La mesure est très imprécise et souffre de plusieurs facteurs d’erreurs : d’une part la mesure logicielle en pixel sur laquelle on ne peut avoir aucun contrôle, d’autre part, les mesures « à la règle » de la mesure de référence sur l’œil de l’opérateur et des valeurs sur l’image de référence pour le ratio sont assez imprécises et peuvent varier à l’ordre de grandeur du millimètre, ce qui est très important vis à vis des valeurs finales.

TABLE 2.3 – Mesure pupillaires en fonction de la luminosité

Gris	Luminance	Diam. théorique	Diam. mesuré œil gauche	Diam. mesuré œil droit
0	0.53 $cd/m^2$	5.59 mm	5.00 mm	4.97 mm
64	2.09 $cd/m^2$	4.54 mm	3.75 mm	3.21 mm
128	11.72 $cd/m^2$	4.01 mm	3.42 mm	3.07 mm
192	27.62 $cd/m^2$	3.78 mm	2.70 mm	2.53 mm
255	42.82 $cd/m^2$	3.66 mm	2.45 mm	2.23 mm

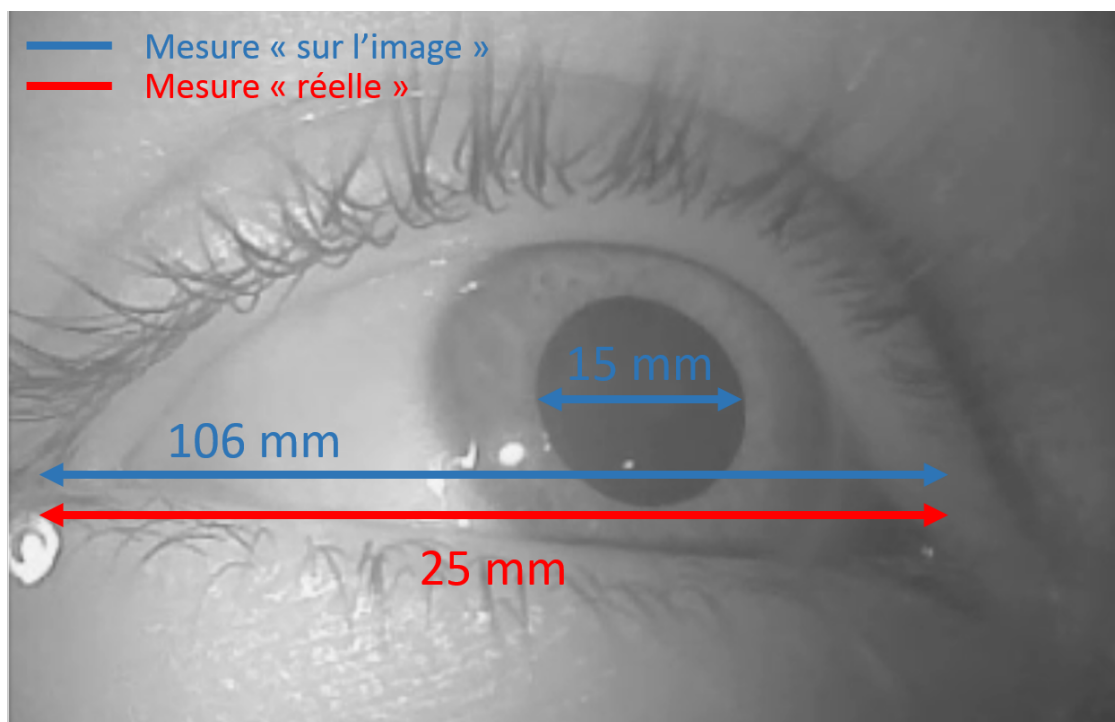


FIGURE 2.6 – Mesures pour la conversion pixel/mm.

Par conséquent nos mesures sont relativement éloignées des diamètres théoriques calculés en fonction de la luminance venant des écrans (Fig. 2.7). Cela ne permet donc pas de valider, ni d'invalider, notre hypothèse de départ qui était l'égalité entre la luminance générée par les écrans et la luminance d'adaptation des yeux. L'expérimentation devra donc se faire en posant cette hypothèse.

## 2.4 Absorption des verres des lunettes 3D

On profite également de ces séries de mesures préliminaires pour vérifier un chiffre donné par le constructeur des lunettes : seulement 17% de la luminosité globale arrive à l'œil après les lunettes stéréoscopiques. Cette donnée aurait pu nous servir directement en tant que valeur de transmittance  $T$  si on avait voulu réaliser notre expérimentation en stéréoscopie. Même si on choisira par la suite de faire passer nos sujets en conditions monoscopiques, il reste intéressant de vérifier ce chiffre de 17% avant sans justifications.

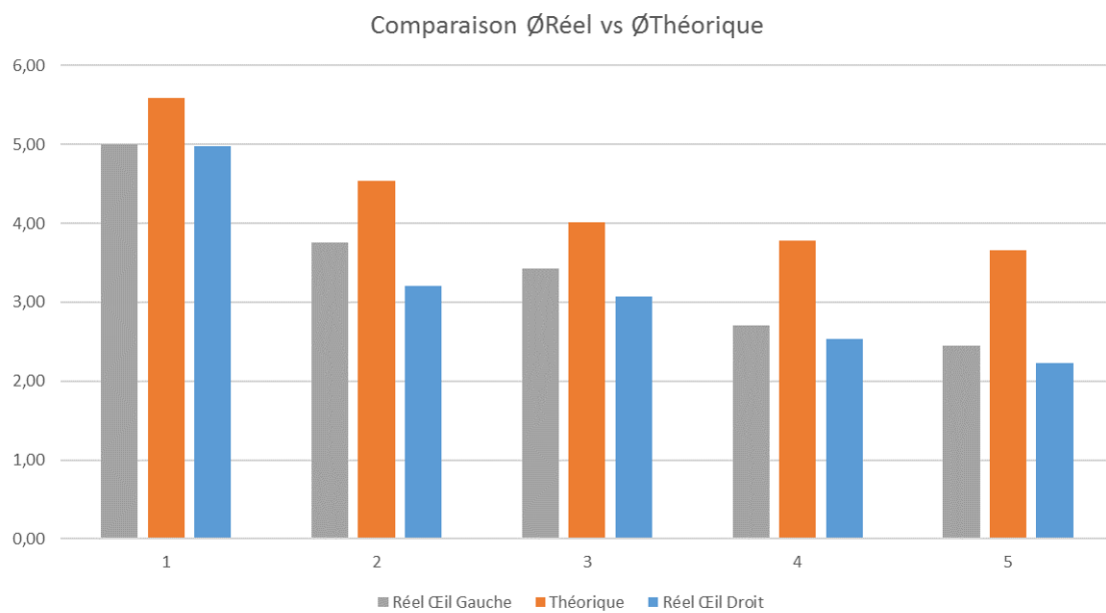


FIGURE 2.7 – Comparaison entre les mesures de diamètre pupillaire par rapport aux valeurs théoriques fonction de la luminance affichée.

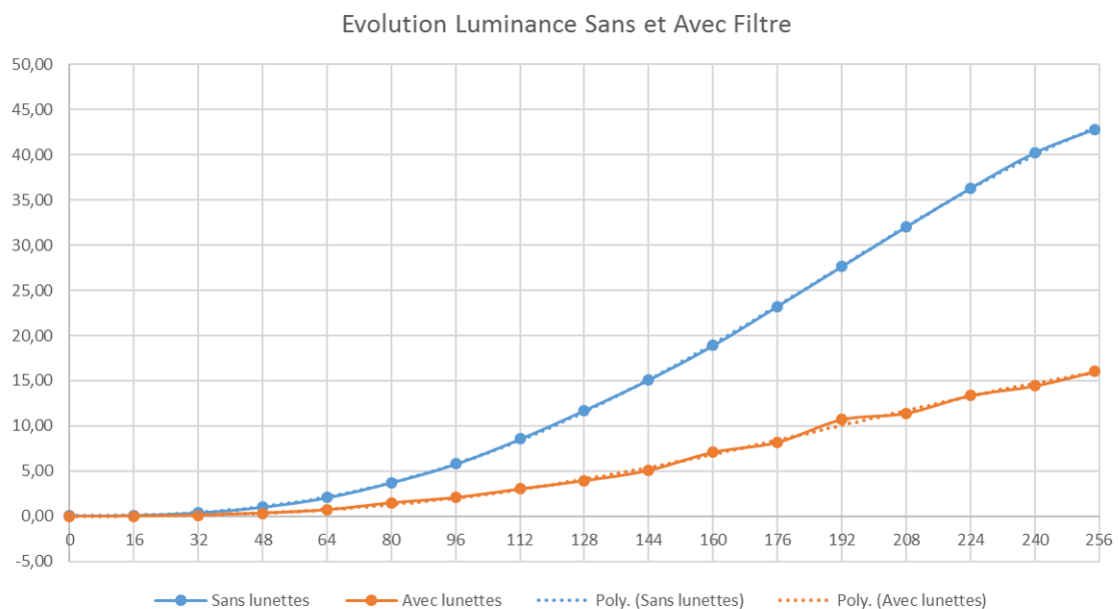


FIGURE 2.8 – Comparaison des mesures sans et avec filtre des lunettes stéréoscopiques.

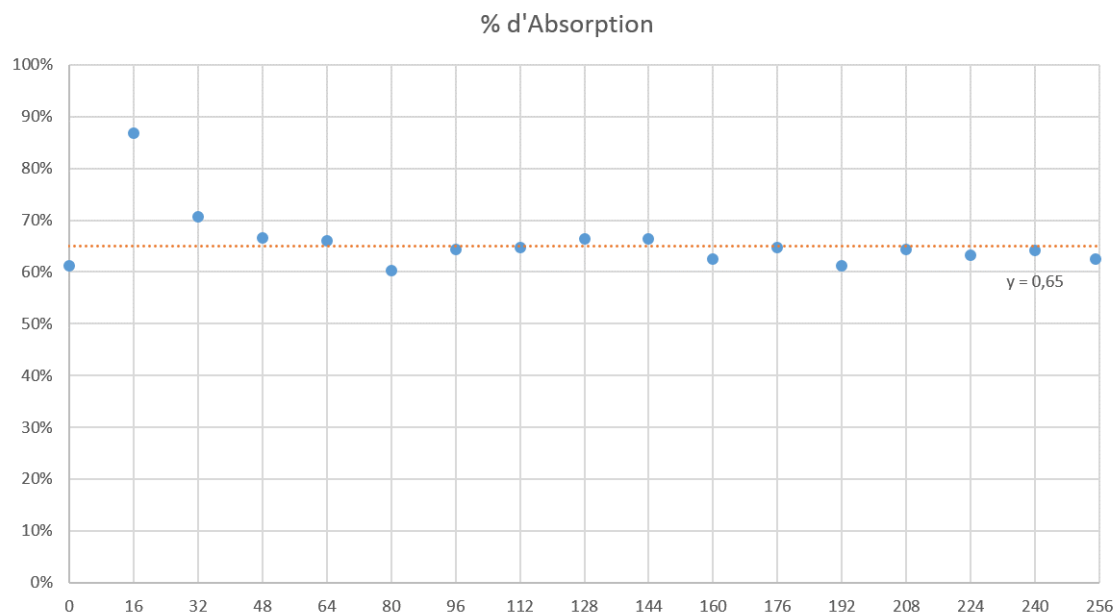


FIGURE 2.9 – Pourcentage d’absorption en fonction du niveau de gris affiché.

En parallèle des mesures décrites précédemment pour la luminance globale, on réalise également des mesures à travers un des deux verres de lunettes stéréoscopiques. Les résultats sont très probants (Fig. 2.9) et donnent une valeur d’absorption moyenne à 65% sur toute la gamme de luminances possibles dans le simulateur soit un taux d’absorption de 35%. Cependant, par construction, en stéréoscopie, les verres ne laissent passer la lumière que la moitié du temps pour permettre de nourrir chaque œil avec la bonne image. On retrouve donc bien la valeur de 17% annoncée par le constructeur.

Là encore, on déduit une régression polynomiale d’ordre 3 ( $R^2 = 1$ ) qui nous donne la relation mathématique (Eq. 2.5) permettant d’anticiper la luminance reçue à travers les verres de lunettes stéréoscopiques en fonction du niveau de gris. Avec  $L_F$  la luminance de la face avant du simulateur à travers le filtre et  $g$  le niveau de gris normalisé.

$$L_C(g) = 0.26 - 6.82 g + 36.55 g^2 - 13.86 g^3 \quad (2.5)$$

On possède désormais tous les éléments pour se lancer dans la vérification expérimentale du modèle de Rea : on connaît parfaitement le comportement en luminance du simulateur, on a vérifié le taux d’absorption des lunettes et on sait que l’hypothèse reliant la luminance de fond et la luminance d’adaptation doit être faite, faute d’avoir pu la démontrer quantitativement.

## CHAPITRE

### 3

# PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

## 3.1 Dispositif

### 3.1.1 Hypothèses de travail

La première et principale hypothèse nécessaire au déroulement de cette expérimentation est que la luminance d'adaptation est considérée comme étant égale à la luminance de background : toutes les sources de luminosité parasites (voyants des ordinateurs, luminosité filtrant par la porte, ...) et la luminosité de la tache à visualiser sont jugées sans influences par rapport à la taille et à la puissance de la source lumineuse qu'est le background.

Cette hypothèse est à un impact à plusieurs niveaux dans l'expérimentation : elle caractérise la valeur de la luminance sensée arriver à l'œil mais elle permet également une simplification dans l'équation de calcul des contrastes proposés aux sujets (voir plus bas, section 3.2.2).

La seconde hypothèse est plus spécifique et concerne également l'équation de calcul du contraste. Rea et Ouellette utilisaient un filtre variable devant l'œil de leurs sujets pour atténuer l'intensité lumineuse et ont donc inclus une valeur de transmittance de ce filtre dans leur calcul du contraste. Nous n'utiliserons pas de filtre (l'expérimentation se déroule entièrement en 2D et donc sans lunettes stéréoscopique) et nous faisons l'hypothèse que cela revient à prendre une transmittance « parfaite », c'est à dire de valeur maximale  $T = 1$ .

Enfin, une dernière hypothèse concerne le mode opératoire directement. Même en ayant pris le plus grand soin possible avec un certain nombre de mesures préliminaires, on fait l'hypothèse qu'il est effectivement possible de reproduire l'expérimentation effectuée par

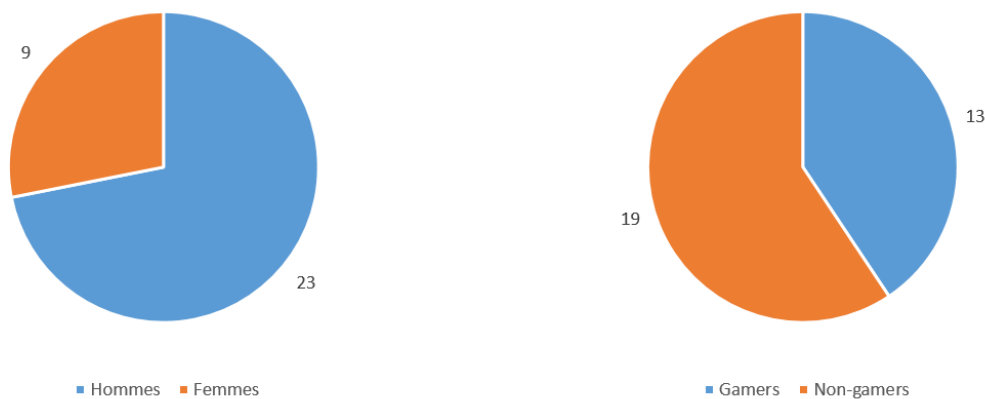


FIGURE 3.1 – Répartitions des sujets pour les expérimentation de contraste/luminance et de comparaison objective/subjective.

Rea et Ouellette et de la « traduire » en Réalité Virtuelle.

On rappelle que pour ce faire, on a calqué de la manière la fidèle possible notre mode opératoire sur le leur. Il existe néanmoins des différences, que ce soit sur l'outillage et la manière d'afficher les stimuli visuels mais également sur le nombre de sujets et surtout la quantité d'essai réalisés (dithyrambique du côté de Rea et Ouellette). L'influence du nombre d'essais réalisés est néanmoins nuancé par le fait qu'on effectue une vérification d'application du modèle contrairement à l'établissement d'une modèle à partir de zéro.

Afin d'éviter tout biais de la part des projecteurs, le passage des sujets s'est fait dans une période de temps rapprochée et avec une période de chauffe de 1h avant le premier sujet de la journée pour que les projecteurs soient stabilisés, comme recommandé par la CIE (IEC 61966-6 :2005).

### 3.1.2 Sujets & matériel

On réunit un total de 32 sujets (Fig. 3.1) pour cette expérimentation, les même que pour l'étude expérimentale décrite dans la partie précédente (Cf. ??). Ces derniers sont volontairement choisis jeunes (entre 20 et 27 ans) pour minimiser l'impact de la dégradation de la vision avec l'âge. Tous les sujets ont donc une vision parfaite, ou corrigée et assimilée parfaite. La moyenne d'âge est de 25 ans, avec un écart-type de 1,8 ans.

De même, les conditions matérielles sont identiques que pour la première expérimentation : dans un simulateur de type CAVE, les sujets sont assis dans un fauteuil de voiture, la tête bien calée dans l'appui-tête. Néanmoins, pour cette expérimentation, les sujets n'utilisent pas de lunettes stéréoscopiques. L'expérimentation se fait donc en affichage monoscopique. Les sujets sont placés de manière à avoir les yeux à 2 mètres du centre de l'écran « principal », la face avant.



### 3.1.3 Tâche à effectuer

L'expérimentation se déroulait en plusieurs étapes. La première consistait simplement en un petit questionnaire visant à relever quelques informations sur le sujet en lui-même : âge, défauts éventuels et correction de vision, sexe, pratique des jeux vidéo. S'en suivait alors l'installation du sujet dans le simulateur et une explication de la tâche à effectuer pour l'expérimentation.

De manière analogue aux expérimentations de Rea et Ouellette, les sujets devaient réagir à l'apparition de petits stimuli visuels sous la forme de disques uniformes de couleur sur un fond uniforme. La consigne était d'appuyer le plus vite possible, dès la perception du stimulus, sur un bouton spécifique (et toujours le même) d'une manette de console. Les couleurs uniformes des cibles et du fond étaient des nuances de gris choisies telles que les valeurs de luminance aux niveaux des yeux et de contraste de l'un par rapport à l'autre soient parfaitement connues (voir plus bas).

La seconde étape était une session blanche d'apparition de stimuli, c'est à dire sans stockage des mesures de temps de réaction, pour assurer une bonne prise en main de la tâche à effectuer, limiter le biais de la découverte et ainsi s'assurer que les temps de réactions mesurés sont les meilleurs. Le nombre de stimuli était légèrement plus faible que pour les sessions normales. La luminance choisie pour la session d'essai était différente de toutes les autres et choisie au milieu du spectre pour éviter tout biais d'habituation.

Les étapes suivantes consistaient au déroulement des différentes sessions (voir le logigramme de déroulement global en Fig. 3.2. Le sous-logigramme « CIBLES » est présenté en Fig. 3.3), une pour chaque condition de luminance. Après chaque session, les conditions lumineuses étaient immédiatement réglées pour la session suivante puis un temps d'attente de 3 à 5 minutes était observé pour permettre aux yeux du sujet de s'adapter à la nouvelle luminance de fond. La consigne était de garder le regard sur les écrans du simulateur. Une fois le sujet adapté aux conditions lumineuses, il pouvait lancer de lui-même l'apparition des stimuli en appuyant sur un autre bouton spécifique de la manette de console.

L'ordre des luminances de fond proposées aux sujets était semi-aléatoire : distribution aléatoire pour chaque sujet mais de telle manière, qu'au global, autant de sujets aient rencontré la condition lumineuse  $p$  en  $k$ -ième position. Par exemple, autant de sujets ont eu la condition de luminance la plus sombre en première session, qu'en deuxième, qu'en troisième, etc.

Tous les contrastes définis et possibles (voir plus bas, section 3.2.2) sont proposés au sujet pour chaque niveau de luminance. La présentation se fait dans un ordre aléatoire grâce à l'algorithme de mélange de Fisher-Yates (aussi appelé *Algorithme P*, voir paragraphe suivant). Le mélange se fait à chaque nouvelle condition lumineuse mise en place : tous les sujets ont donc eu potentiellement une série différente à chaque fois et il n'était pas possible de prédire l'ordre avant de lancer l'apparition des cibles. L'apparition de chaque cible était espacée à chaque fois d'un temps incompressible de 1000 ms auquel s'ajoutait un temps aléatoire compris en 2000 et 4000 ms.

Le principe de fonctionnement du mélange de Fisher-Yates, pour mélanger un tableau « T »

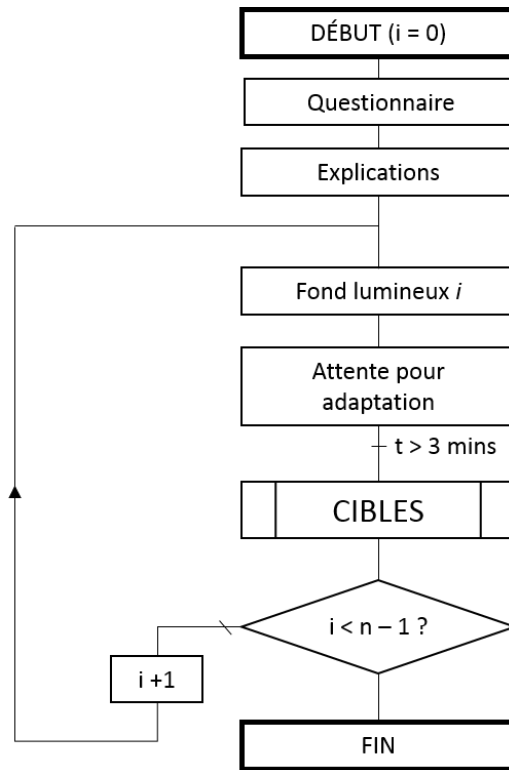


FIGURE 3.2 – Déroulement global de l'expérimentation contraste/luminance.

de  $n$  éléments (indices allant de 0 à  $n - 1$ ), est le suivant :

Pour  $i$  allant de  $n-1$  à 1 faire :  
 $j \leftarrow$  entier aléatoire entre 0 et  $i$   
 échanger  $T[j]$  et  $T[i]$

L'algorithme a une complexité linéaire et donne toutes les permutations avec la même probabilité. Il a été pensé de telle sorte que chaque élément du tableau ne bouge qu'une seule fois.

Le déroulement d'une session, c'est à dire à un niveau de luminance donné, est résumé dans le logigramme en Fig. 3.3.

## 3.2 Choix des conditions expérimentales

### 3.2.1 Luminance

Les conditions lumineuses de fond sont choisies de manière arbitraire, espacées régulièrement sur l'axe 0-255 bits (valeurs minimale et maximale pour coder une couleur sur 8 bits), d'une valeur d'au moins 32 bits (soit au moins 1/8ème de la plage totale de gris). On choisit

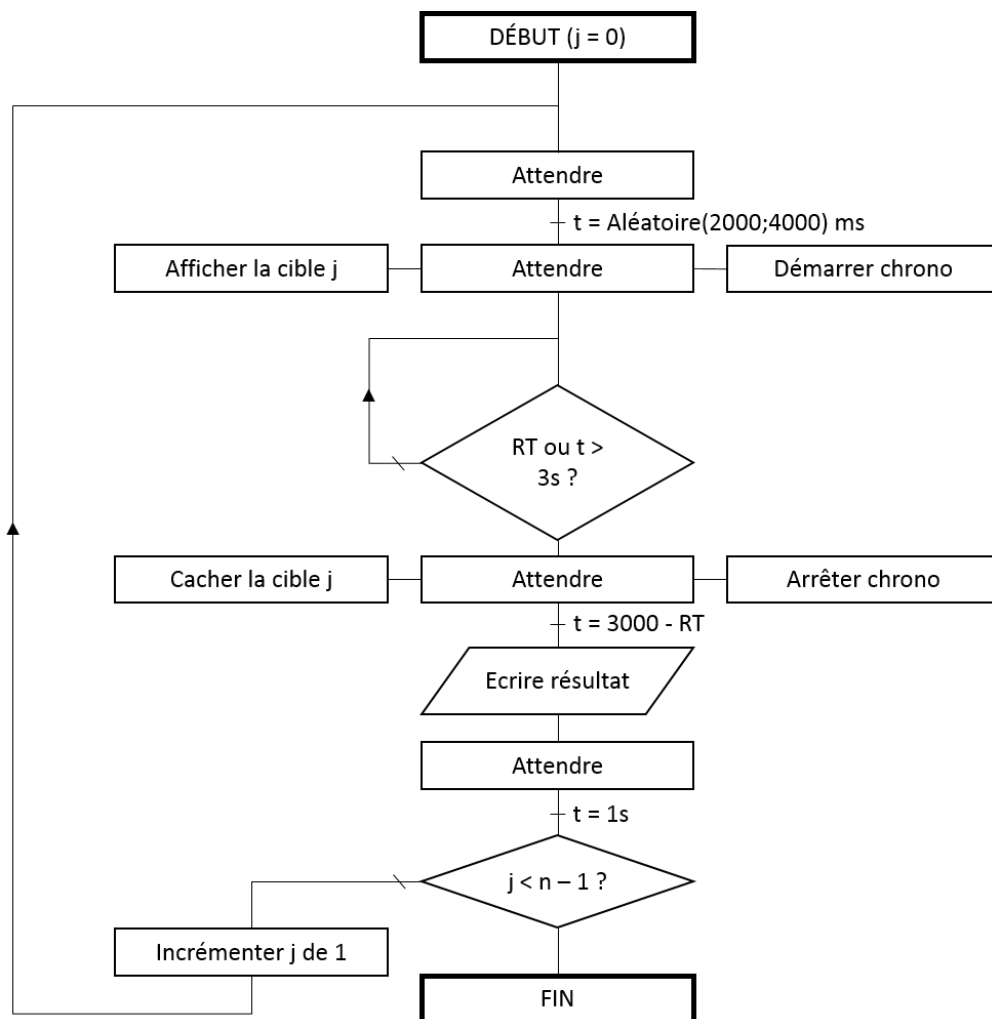


FIGURE 3.3 – Déroulement d’une session de mesure de temps de réactions pour une luminance de fond donnée.

évidemment les conditions extrêmes, à savoir la luminance liée à un background entièrement noir et la luminance liée à un background entièrement blanc. On choisit également la luminance associée au gris médian, c'est à dire 128 bits pour chacune des composantes R, G et B de la couleur affichée. Comme on a pu voir précédemment dans le chapitre sur les mesures préliminaires préalables au bon déroulement de l'expérimentation, les niveaux de luminance choisis sont associés aux niveaux de gris 0, 32, 80, 128, 176 et 255. On se limite à 6 conditions lumineuses différentes dans un souci de temps requis pour faire passer les sujets sur tous les niveaux, pour tous les contrastes calculés.

Tous nos niveaux de luminance sont compris dans les conditions pour lesquelles Rea et Ouellette ont établi leur modèle. Les limites de ce dernier sont fixées entre 0.53 et 801  $Td$  (Trolands<sup>1</sup>) vus à travers une pupille artificielle d'un diamètre de 2 mm. Cela équivaut donc à des extrema lumineux à respectivement 0.17  $cd/m^2$  et environ 255  $cd/m^2$  ; tandis que nos extrema sont situés à 0.53  $cd/m^2$  pour la condition la plus sombre et 42.82  $cd/m^2$  pour la condition la plus claire.

### 3.2.2 Contraste

Pour calculer les différents niveaux de contraste que l'on va proposer aux sujets, on se base sur la même équation de contraste utilisée par Rea et Ouellette (Eq. 3.1). Cette dernière permet de calculer des valeurs de contraste comprises entre 0 et 1. On choisit, dans la mesure du possible (voir plus bas), de prendre des valeurs de contraste à intervalle régulier sur l'axe 0-1, espacés d'un dixième au maximum et d'un vingtième pour détailler la partie 0-0.25 de l'axe. Les valeurs de contraste cible/fond à atteindre sont donc : 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 et 1 ; soit 13 valeurs. On peut atteindre ces valeurs de contraste par valeur « inférieure » c'est à dire avec une cible plus sombre que le fond (typiquement une cible grise sur fond blanc), mais également par valeur « supérieure », c'est à dire avec une cible plus claire que le fond sur laquelle elle est affichée. Cela nous donne un total maximal théorique de 26 contrastes différents à tester par niveau de luminosité. Néanmoins, dans la plupart des cas, il n'est pas possible d'afficher tous les contrastes souhaités voire de ne pas pouvoir afficher du tout soit les contrastes « par valeur supérieure », soit les contrastes « par valeur inférieure ». Typiquement, dans la condition de fond entièrement noir, il n'est pas possible d'afficher des cibles plus sombres et on ne peut donc avoir que des contrastes « supérieurs ».

$$C = \frac{|(TL_b + L_v) - (TL_t + L_v)|}{TL_b + L_v} = \frac{T|L_b - L_t|}{L_a} \quad (3.1)$$

Il est maintenant nécessaire de déterminer quelle doit être la couleur du stimuli affiché, par rapport à la couleur du fond, pour atteindre précisément le contraste désiré. C'est ici que rentrent en jeu nos deux hypothèses préalablement établies (Cf. 3.1.1) : l'égalité entre la luminance d'adaptation et la luminance de background ( $L_a = L_B$ ) d'un côté et la transmittance prise à sa valeur maximale ( $T = 1$ ) de l'autre. On peut donc simplifier

---

1. Le Troland est une unité de luminance pupillaire, définie par l'équation suivante :  $Td = L \times p$  ; avec  $L$  la luminance qui arrive à l'œil en  $cd/m^2$  et  $p$  la surface de la pupille en  $mm^2$ .

l'équation 3.1 et la transformer en une équation adaptée à notre dispositif (Eq. 3.2), avec  $L_b$  la luminance du fond et  $L_t$  la luminance de la « target », le stimuli :

$$C = \frac{T|L_b - L_t|}{L_a} \Rightarrow C = \frac{|L_b - L_t|}{L_b} \quad (3.2)$$

Grâce aux régressions linéaires établies précédemment (cf. ), on peut écrire  $L_b$  et  $L_t$  comme des fonctions du niveau de gris dans notre simulateur, soit l'équation 3.3 avec  $B$  la valeur entre 0 et 255 associée à la nuance de gris du fond. De même, l'équation 3.4 avec  $T$  la valeur entre 0 et 255 associée à la nuance de gris de la cible, l'indice  $B$  étant relatif à la nuance de gris du fond :

$$L_b = f\left(\frac{B}{255}\right) \quad (3.3)$$

$$L_t = f_B\left(\frac{T}{255}\right) \quad (3.4)$$

On obtient donc, au final, l'équation suivante qui nous permet de calculer avec précision la valeur de la nuance de gris de la cible à afficher lorsque qu'on connaît la nuance de gris du fond pour afficher un contraste choisi (Eq. 3.5) :

$$C = \frac{|f\left(\frac{B}{255}\right) - f_B\left(\frac{T}{255}\right)|}{f\left(\frac{B}{255}\right)} \quad (3.5)$$

Néanmoins, comme décrit précédemment, on souhaite pouvoir calculer des contrastes « supérieurs » et « inférieurs », hors cette équation ne fonctionne que si la luminance de fond est supérieure à la luminance de la cible. Il faut donc adapter l'équation pour calculer les contrastes « supérieurs » (Eq. 3.6) :

$$C = \frac{|f\left(\frac{B}{255}\right) - f_B\left(\frac{T}{255}\right)|}{f_B\left(\frac{T}{255}\right)} \quad (3.6)$$

On présente dans les tables suivantes les valeurs de nuances de gris nécessaires pour afficher les contrastes par valeur « supérieure » (Tab. 3.1) et par valeur « inférieure » (Tab. 3.2). La première ligne donne les contrastes obtenus, la première colonne les niveaux de gris en background et le reste du tableau le niveau de gris du stimuli. On peut voir que notamment dans le cas du background le plus sombre, les valeurs ne varient que de 1 bit et donc qu'il ne serait pas possible avec notre système d'avoir un pas de variation du

contraste plus fin. On remarque que, pour les contrastes supérieurs 0.15 et 0.2 sur fond noir, la même valeur de gris est associée. Ce cas est unique et vient du fait que la régression linéaire est continue alors que l'on cherche des valeurs ponctuelles, pour des valeurs très proches ni l'arrondi ni la troncature ne permettent de les départager. On a donc ignoré une des deux valeurs pendant l'expérimentation.

TABLE 3.1 – Valeurs des nuances de gris du stimulus nécessaire pour afficher un contraste par valeur supérieur désiré.

<b>C</b>	<b>0.05</b>	<b>0.1</b>	<b>0.15</b>	<b>0.2</b>	<b>0.25</b>	<b>0.3</b>	<b>0.4</b>	<b>0.5</b>	<b>0.6</b>	<b>0.7</b>	<b>0.8</b>	<b>0.9</b>	<b>1</b>
<b>0</b>	16	17	18	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
<b>32</b>	33	35	36	37	38	39	41	42	44	46	47	49	50
<b>80</b>	85	88	90	93	95	98	102	106	110	114	118	121	125
<b>128</b>	133	138	142	147	151	156	164	172	180	187	195	203	211
<b>176</b>	182	190	198	206	214	222	239						
<b>255</b>													

TABLE 3.2 – Valeurs des nuances de gris du stimulus nécessaire pour afficher un contraste par valeur supérieur désiré.

<b>C</b>	<b>0.05</b>	<b>0.1</b>	<b>0.15</b>	<b>0.2</b>	<b>0.25</b>	<b>0.3</b>	<b>0.4</b>	<b>0.5</b>	<b>0.6</b>	<b>0.7</b>	<b>0.8</b>	<b>0.9</b>	<b>1</b>
<b>0</b>													
<b>32</b>	31	29	28	27	26	24	22	19	15				
<b>80</b>	79	76	74	71	69	66	61	57	52	47	52	37	31
<b>128</b>	123	118	114	109	105	101	93	85	78	70	62	52	40
<b>176</b>	167	160	153	147	140	135	123	112	101	91	79	67	50
<b>255</b>	232	218	206	196	186	177	161	146	132	117	102	86	66

A titre d'exemple, lorsque la couleur de background est un gris 128 (Code RGB = (128, 128, 128), pour afficher un stimulus contrasté par valeur supérieure à 0.3, il faut que la cible soit un gris 156, c'est à dire avec un code RGB égal à (156, 156, 156).

Maintenant que l'on a choisi les luminances de fond, que l'on sait à quelle nuance de gris elles correspondent, qu'on a choisi les contrastes que l'on voulait afficher et que l'on sait à quelles couleurs ils correspondent, on peut passer à la partie purement expérimentale et inviter des sujets à confronter leurs temps de réaction à l'apparition de nos stimuli calibrés. Les résultats théoriques et pratiques de ces expérimentations sont présentés dans le chapitre suivant.

## CHAPITRE

# 4

# RÉSULTATS

## 4.1 Prédiction du modèle théorique

On calcule les temps de réactions prévus par le modèle que l'on cherche à vérifier. Ces temps sont en millisecondes (ms). On présente ces résultats sous forme de tableau avec en colonne les différents contrastes affichés et en ligne les niveaux de gris du background (Table 4.1).

On laisse une case vide dans le tableau lorsque le modèle n'est pas capable de prédire un temps de réaction : le sujet n'est pas censé réussir à distinguer le stimuli par rapport au fond. On remarque également que certaines valeurs sont complètement démesurées (typiquement, il faudrait théoriquement 25 secondes à un individu pour distinguer un stimuli contrasté à 0.20 sur un fond gris 80). Ces valeurs sont dues à un diviseur très proche de zéro dans les formules utilisées qui rend les valeurs de contraste proches du contraste seuil théorique très volatiles.

Pour l'ensemble des conditions, les valeurs de temps de réaction (une fois passé le seuil limite de contraste) croissent régulièrement jusqu'à tendre vers une asymptote pour les conditions les plus lumineuses.

## 4.2 Mesures réelles

Les mesures réelles sont mesurées directement par le logiciel qui affiche les stimuli. Les résultats sont ensuite écrits dans un fichier externe que l'on récupère et que l'on traite ensuite dans Excel. La précision des mesures est limitée par le nombre d'images par seconde auquel le programme tourne : à chaque image, le programme vérifie si le sujet appuie ou

TABLE 4.1 – Temps de réaction théoriques (en ms) prédits par le modèle de Rea et Ouellette.

C/L	0	32	80	128	176	255
<b>0.05</b>						
<b>0.10</b>						
<b>0.15</b>					10865	3594
<b>0.20</b>			25435	1924	1429	1212
<b>0.25</b>			1686	1041	912	839
<b>0.30</b>			1039	788	725	685
<b>0.40</b>		2663	696	596	568	549
<b>0.50</b>		1272	577	517	499	546
<b>0.60</b>		929	517	473	549	449
<b>0.70</b>		773	481	446	434	425
<b>0.80</b>	4451	684	456	426	416	409
<b>0.90</b>	2448	626	439	412	403	396
<b>1.00</b>	1720	585	425	402	393	387

non sur le bouton de détection et stoppe le chronomètre le cas idoine. Toute action entre 2 images est donc ignorée jusqu'au calcul suivant. C'est pourquoi la précision des mesures de temps est précise à un demi-temps inter-image près. Le programme fonctionnant à 120 images par secondes (la limite se faisant au niveau du projecteur), la précision est donc de 1/240ème de seconde soit 4 *ms*. Au regard des valeurs attendues (les temps les plus rapides prévus dans nos conditions par le modèle sont de 400 *ms*) cela représente une erreur de 1% qui peut donc être négligée.

Les moyennes des temps de réaction mesurés et leurs écart-types sont listés dans la Table 4.2. Etant donné que la population de sujet était supérieure ou égale à 30, on a pu calculer l'écart type réel (Pearson) et non pas un estimateur. Les valeurs si situent entre 371 *ms* et 670 *ms* avec une moyenne des moyennes (en excluant les valeurs divergentes, voir plus loin) à 437 *ms* (écart-type = 53 *ms*) et un écart-type moyen de 96 *ms* (écart-type = 82 *ms*). On nota particulièrement la valeur de temps de réaction (2013 *ms*) atteinte pour un contraste de 0.05 et une luminance de fond de 0.41 *cd/m²*).

La performance *R* est définie telle que l'inverse du temps de réaction *RT* :  $R = 1/RT$ . On l'utilise, plutôt que le temps de réaction, pour décrire les résultats obtenus : la performance augmente quand le temps de réaction diminue et inversement, ce qui semble plus logique. Les figures 4.1, 4.2 et 4.3 montrent, pour chaque condition lumineuse, la comparaison entre la performance théorique que l'on devrait avoir et la performance réelle mesurée pendant l'expérimentation. Les points correspondant à une performance nulle décrivent les points en dessous du seuil de perception : le temps de réaction est alors « infini » et donc son inverse (la performance) tend vers 0.



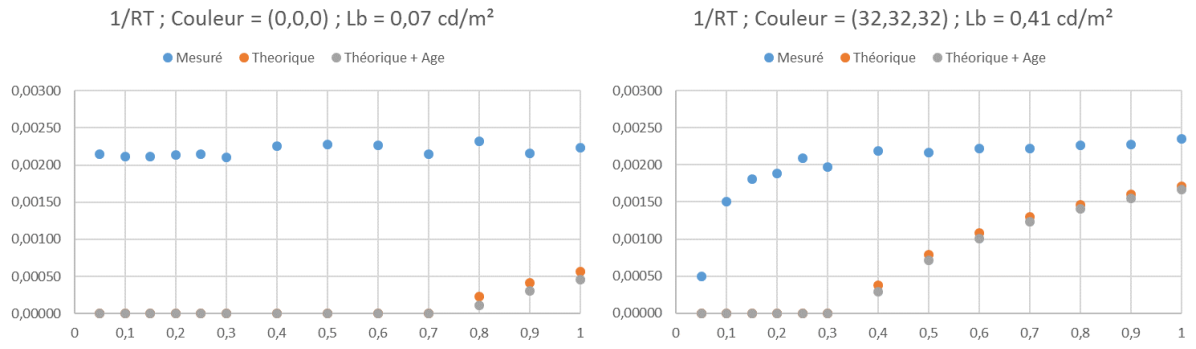


FIGURE 4.1 – Performance théorique et réelle pour l'expérimentation de détection des stimuli contrastés, conditions 0 et 32.

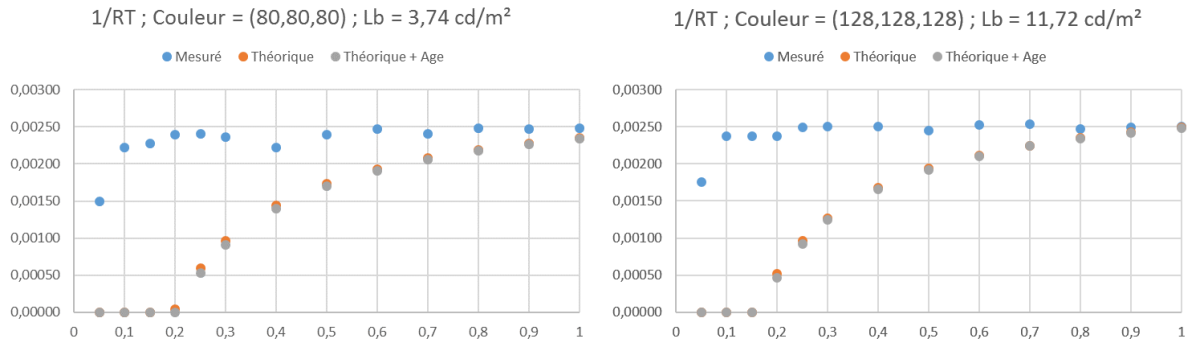


FIGURE 4.2 – Performance théorique et réelle pour l'expérimentation de détection des stimuli contrastés, conditions 80 et 128.

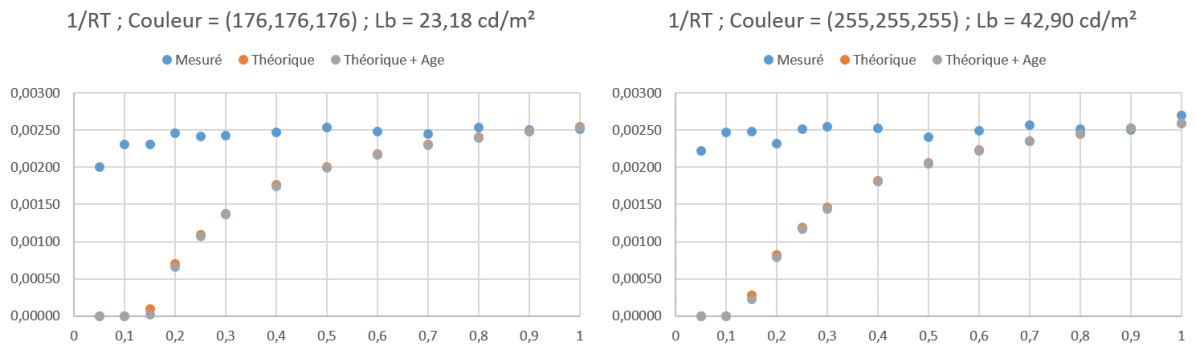


FIGURE 4.3 – Performance théorique et réelle pour l'expérimentation de détection des stimuli contrastés, conditions 176 et 255.

TABLE 4.2 – Temps de réaction moyens réels (en ms) mesurés pendant l’expérimentation et leurs écart-types moyens.

C/L	0	32	80	128	176	255
<b>0.05</b>	465 ± 58	2013 ± 429	670 ± 112	572 ± 314	500 ± 290	450 ± 155
<b>0.10</b>	474 ± 98	663 ± 447	450 ± 86	421 ± 66	434 ± 71	406 ± 50
<b>0.15</b>	474 ± 85	553 ± 286	439 ± 78	421 ± 85	434 ± 99	404 ± 48
<b>0.20</b>	468 ± 67	531 ± 323	418 ± 48	422 ± 87	407 ± 75	432 ± 88
<b>0.25</b>	465 ± 158	479 ± 63	415 ± 68	101 ± 50	141 ± 62	398 ± 92
<b>0.30</b>	475 ± 141	507 ± 215	423 ± 73	399 ± 53	412 ± 63	393 ± 72
<b>0.40</b>	443 ± 74	457 ± 59	451 ± 221	400 ± 59	406 ± 63	396 ± 52
<b>0.50</b>	440 ± 44	461 ± 78	418 ± 71	409 ± 62	394 ± 42	415 ± 67
<b>0.60</b>	440 ± 58	451 ± 66	405 ± 52	396 ± 52	403 ± 6	402 ± 81
<b>0.70</b>	466 ± 94	450 ± 80	416 ± 72	394 ± 49	408 ± 57	390 ± 48
<b>0.80</b>	432 ± 68	443 ± 67	402 ± 46	405 ± 80	394 ± 48	398 ± 67
<b>0.90</b>	464 ± 79	440 ± 61	404 ± 58	402 ± 61	400 ± 64	399 ± 77
<b>1.00</b>	448 ± 152	426 ± 41	403 ± 52	401 ± 77	398 ± 64	371 ± 48

### 4.3 Analyse et discussion

Le premier résultats qui frappe est qu’alors que le modèle de Rea prévoit que certains stimuli ne doivent pas être vus (étant en dessous du seuil), nos sujets ont été capables de voir toutes les taches lumineuses qui leur étaient présentées, et ce, quelles que soient les conditions de luminance et de contraste.

Deuxièmement, la différence entre le comportement théorique prévu et les mesures sur nos sujets est radicale. Alors que la performance est sensée augmenter avec le contraste et la luminance, il apparait que notre performance est toujours constante. Les sujets avaient un temps de réaction globalement identique avec des conditions lumineuses pourtant très différentes. En se fiant aux prédictions du modèle de Rea et Ouellette, les sujets ne devraient pas être aussi capables : il devraient d’abord ne rien voir puis, alors que la luminance et surtout le contraste augmentent, être de plus en plus bons. Les comportements étant aussi radicalement opposés, nous n’avons pas jugé nécessaire de déployer une méthode statistique pour vérifier si les échantillons de mesure (mesures théoriques et mesures pratiques) étaient appariés.

Au final, nos résultats ne correspondent pas du tout avec les prévisions de Rea et Ouellette mais convergent néanmoins vers les même valeurs. Bien que nous ayons fait de notre mieux pour traduire l’expérimentation initiale dans notre simulateur, il existe néanmoins toujours des différences fondamentales entre les prévisions et les mesures.

La différence principale entre les deux dispositifs expérimentaux et la quantité de lumière

qui arrive à l'œil, et la quantité de sources lumineuses. Du côté de Rea et Ouellette, la seule source de lumière était un petit écran situé à une distance de 1.68 *m* du sujet, en plus d'une lumière dirigée directement dans l'œil au moyen d'un miroir semi transparent. De plus, la quantité de lumière arrivant à l'œil était également contrôlée avec un filtre devant l'œil. De notre côté, la lumière est issue d'écrans géants entourant le sujet ainsi qu'une multitude de petites lumières indirectes : les projecteurs émettent leur lumière en direction des écrans. Nous n'avons pas braqué de lumière directement dans l'œil de nos sujets et nous n'avons pas utilisé de filtre pour atténuer la lumière (tout en plaçant néanmoins des hypothèses). Enfin, Rea et Ouellette filtraient la lumière arrivant à l'œil au moyen d'un filtre mais le montage ne semble pas être complètement étanche et a pu laisser passer de la lumière parasite non atténuée.

Ainsi, de part la comparaison entre nos résultats et les prédictions, à notre avis, le modèle de Rea et Ouellette ne devrait pas être utilisé dans le domaine de la Réalité Virtuelle pour déterminer la performance de l'œil (par rapport à la modélisation de la vision humaine), avec pour seule base le contraste et la luminance.

# CONCLUSION

L'objectif de cette première expérimentation était d'alimenter la brique « contraste luminance » de notre modèle de score pour la Réalité Virtuelle. Le postulat de base était qu'il existe des modèles qui définissent une performance, entièrement basée sur le système visuelle, et qui prennent notamment en paramètre d'entrée le contraste et la luminance, mais ces modèles n'ont pas été fait pour la Réalité Virtuelle, ni même pour des écrans quelconques. On cherche alors a démontrer la transposabilité d'un de ces modèles dans notre domaine afin de pouvoir l'utiliser directement dans notre score.

La démarche était donc de reproduire le protocole expérimental ayant servi à établir le modèle initial, mais en le transposant dans un simulateur, et de quantifier la bonne corrélation entre les valeurs prévues par le modèle et celles mesures sur des sujets. Les résultats sont de ce point de vue là décevant car ils montrent un comportement radicalement différent de ce qui était prévu. Bien que l'on ait quelques hypothèses sur l'origine de cette différence de comportement, cette dernière reste encore difficile à expliquer pleinement.

On peut établir un certain nombre de choses de cette expérimentation. Premièrement, le modèle de Rea, et plus particulièrement la variante développée par Rea et Ouellette avec des temps de réaction, ne semble pas fonctionner pour la Réalité Virtuelle. Ensuite, et par extension, on ne peut pas utiliser directement le modèle de Rea comme on le souhaitait pour établir le critère de « contraste/luminance » de notre modèle de score. Cela n'implique pas néanmoins l'impossibilité de corrélér notre critère avec un autre modèle de performance visuelle.

Se pose alors la question de la continuité à donner aux résultats de cette expérimentation. On peut choisir de continuer à approfondir la performance visuelle, en créant par exemple notre propre modèle, mais on choisit de s'intéresser à une autre brique élémentaire de notre modèle de score : la latence. Ce changement de sujet permet de travailler plusieurs aspects du modèle et de ne pas s'enfermer dans une seule branche. Le chapitre suivant concerne donc la partie expérimentale autour du traitement du critère suivant, la latence.

# **Bibliographie**

Blackwell, O. Mortenson, & Blackwell, H. Richard. 1971. IERI : Visual Performance Data for 156 Normal Observers of Various Ages. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, **1**(1), 3–13.

Naka, K. I., & Rushton, W. A. H. 1966. An attempt to analyse colour reception by electrophysiology. *The Journal of Physiology*, **185**(3), 556–586.

Rea, M. S. 1987. Toward a Model of Visual Performance : A Review of Methodologies. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, **16**(1), 128–142.

Rea, M. S., & Ouellette, M. J. 1988. Visual performance using reaction times. *Lighting Research and Technology*, **20**(4), 139–153.

Rea, Mark S. 1986. Toward a Model of Visual Performance : Foundations and Data. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, **15**(2), 41–57.

Rea, Mark S., & Ouellette, Michael J. 1991. Relative visual performance : A basis for application. *Lighting Research and Technology*, **23**(3), 135–144.

# **ANNEXES**

# CALCUL DE LA PERFORMANCE VISUELLE, MÉTHODE DES TEMPS DE RÉACTION

## Performance visuelle générique

Quatre paramètres d'entrée sont nécessaires :

- L'aire de la cible visuelle  $\omega$  en stéradians ( $2.0 \times 10^{-6} \leq \omega \leq 2.8 \times 10^{-3}$ ),
- Le rayon pupillaire  $r$  en millimètres obtenu avec le modèle de Weale :  $2r = 4.77 - 2.44 \tanh[0.3 \log_{10}(L_A)]$ ,
- La luminance d'adaptation  $L_A$  en candela par mètre carré ( $cd/m^2$ ),
- Les luminances relatives à la tache visuelle : luminance du fond d'affichage ( $L_b$ ) et luminance de la cible ( $L_t$ ).

## Calcul du contraste de seuil $C_{t,d}$

$$\begin{cases} A = \log_{10} [\tanh(20000 \omega)] \\ L = \log_{10} \left[ \log_{10} \left( \frac{10 I_R}{\pi} \right) \right] \\ I_R = L_A \pi r^2 \end{cases} \quad (1)$$



$$\log_{10}(C_{t,d}) = -1.36 - 0.179 A - 0.813 L + 0.226 A^2 - 0.0772 L^2 + 0.169 A L \quad (2)$$

## Calcul de la constante de semi-saturation $K$

$$\begin{cases} A* = \log_{10} [\tanh(5000 \omega)] \\ L* = \log_{10} \left[ \tanh \left( \frac{0.04 I_R}{\pi} \right) \right] \end{cases} \quad (3)$$

$$\log_{10}(K) = -1.76 - 0.175 A* - 0.0310 L* + 0.112 A*^2 + 0.171 L*^2 + 0.0622 A* L* \quad (4)$$

## Calcul de la réponse maximale $R_{max}$

$$R_{max} = 0.000196 \log_{10}(I_R) + 0.00270 \quad (5)$$

## Calcul de la performance $R$

$$\begin{cases} C_V = \frac{T|L_b - L_t|}{L_a} \\ \Delta C_d = |C_V - C_{t,d}| \end{cases} \quad (6)$$

$$R = \frac{(\Delta C_d)^{0.97}}{(\Delta C_d)^{0.97} + K^{0.97}} \quad (7)$$

## Ajout de l'influence de l'âge

Avec  $a$  l'âge de l'observateur en années,  $a \geq 20$ .

## Réduction de l'illumination rétinienne

$$\begin{cases} P = 1 - 0.017 (a - 20) \\ 2r = 4.77 - 2.44 \tanh[0.3 \log_{10}(L_a)] \end{cases} \quad (8)$$

$$I'_R = P I_R = P L_A \pi r^2 \quad (9)$$

## Réduction du contraste rétinien

$$\begin{cases} A = \log_{10} [\tanh(20000 \omega)] \\ L = \log_{10} \left[ \log_{10} \left( \frac{10 I_R}{\pi} \right) \right] \\ \epsilon = 1 + \left[ \frac{0.113}{45} (a - 20) \right] \end{cases} \quad (10)$$

$$\log_{10} \left( \frac{C'_{t,d}}{\epsilon} \right) = -1.36 - 0.179 A - 0.813 L + 0.226 A^2 - 0.0772 L^2 + 0.169 A L \quad (11)$$

# MESURES DE LUMINANCE

## Luminance de fond

TABLE 1 – Luminance globale du simulateur en fonction de la nuance de gris affichée.

Gris	Bas-gauche	Haut-gauche	Centre	Bas-droit	Haut-droit	Moyenne
0	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07 $cd/m^2$
16	0.13	0.13	0.12	0.13	0.13	0.13 $cd/m^2$
32	0.40	0.40	0.39	0.43	0.42	0.41 $cd/m^2$
48	1.02	1.01	1.00	1.08	1.04	1.03 $cd/m^2$
64	2.06	2.02	2.01	2.22	2.11	2.09 $cd/m^2$
80	3.68	3.65	3.56	3.96	3.82	3.73 $cd/m^2$
96	5.86	5.55	5.65	5.97	5.90	5.79 $cd/m^2$
112	8.44	8.26	8.25	9.06	8.74	5.88 $cd/m^2$
128	11.40	11.30	11.30	12.40	12.20	11.72 $cd/m^2$
144	14.17	14.53	14.83	16.07	15.87	15.09 $cd/m^2$
160	17.73	18.07	18.50	20.17	19.93	18.88 $cd/m^2$
176	21.80	22.03	22.77	24.87	24.63	23.22 $cd/m^2$
192	26.03	26.37	27.30	29.47	28.93	27.62 $cd/m^2$
208	30.27	30.57	31.77	33.80	33.60	32.00 $cd/m^2$
224	34.23	34.70	35.93	38.50	38.00	36.27 $cd/m^2$
240	37.97	38.47	39.63	42.80	42.13	40.20 $cd/m^2$
255	40.53	40.97	42.53	45.53	44.53	42.82 $cd/m^2$

# Luminance de cible

TABLE 2 – Luminance de la cible (en  $cd/m^2$ ) en fonction de sa nuance de gris et de la nuance de gris du fond.

<b>Gris</b>	<b>Fond : 0</b>	<b>Fond : 32</b>	<b>Fond : 80</b>	<b>Fond : 128</b>	<b>Fond : 176</b>	<b>Fond : 255</b>
0	0.06	0.22	1.73	5.51	11.10	2030
16	0.09	0.26	1.76	5.54	11.10	20.30
32	0.25	0.40	1.91	5.68	11.30	20.60
48	0.58	0.73	2.23	6.00	11.60	20.80
64	1.13	1.28	2.78	6.55	12.10	21.40
80	1.94	2.11	3.61	7.38	12.93	22.20
96	3.06	3.20	4.70	8.46	14.00	23.30
112	4.46	4.61	6.13	9.87	15.50	24.70
128	6.24	6.40	7.87	11.60	17.20	26.50
144	8.20	8.36	9.88	13.57	19.10	28.40
160	10.30	10.40	11.90	15.70	21.30	30.60
176	12.60	12.80	14.30	18.00	23.20	32.90
192	15.00	15.10	16.67	20.37	25.90	35.20
208	17.40	17.60	19.10	22.80	28.30	37.57
224	19.80	19.90	21.47	25.10	30.70	40.00
240	21.97	22.17	23.63	27.30	32.87	42.07
255	23.37	23.53	25.03	28.77	34.30	43.40