

THÈSE DE DOCTORAT
Immersion Visuelle Hyper-réaliste et
multi-sensorielle 3D

TABLE DES MATIÈRES

Table des figures	4
Liste des tableaux	5
I Partie expérimentale : contraste & luminance	6
Introduction	7
1 Modèles de Rea	8
1.1 Première modélisation de la performance visuelle relative	8
1.1.1 Modèle précurseur	8
1.1.2 Application à la performance visuelle	9
1.2 Méthode des temps de réaction	10
1.2.1 Protocole expérimental	10
1.2.2 Calcul des temps de réaction théoriques	11
2 Mesures préliminaires	13

2.1	Luminance globale (luminance de fond)	13
2.2	Luminance de la cible (luminance de tache)	15
2.3	Diamètre pupillaire	17
2.4	Absorption des verres des lunettes 3D	20
Bibliographie		22
ANNEXES		25
Calcul de la performance visuelle, méthode des temps de réaction		25
Luminance de fond		28

TABLE DES FIGURES

1.1	Illustration de l'effet de compression. Image tirée de [Naka & Rushton, 1966]	9
1.2	Installation de l'expérimentation de Rea et Ouellette. Image tirée de [Rea & Ouellette, 1988]	11
2.1	Chromameter CS100	14
2.2	Evolution de la luminance en fonction du niveau de gris sur les cinq points de mesure et leur moyenne.	15
2.3	Luminance de la cible en fonction de la luminance globale	16
2.4	Oculomètre Dikablis Professional	17
2.5	Exemple d'une mesure en pixel de largeur pupillaire au cours du temps.	18
2.6	Mesures pour la conversion pixel/mm.	18
2.7	Comparaison entre les mesures de diamètre pupillaire par rapport aux valeurs théoriques fonction de la luminance affichée.	19
2.8	Comparaison des mesures sans et avec filtre des lunettes stéréoscopiques.	20
2.9	Pourcentage d'absorption en fonction du niveau de gris affiché.	21

LISTE DES TABLEAUX

2.1	Extrait des mesures de luminance globale du simulateur en fonction de la nuance de gris affichée.	14
2.2	Extrait des mesures de luminance du disque en fonction de sa nuance de gris et de la nuance globale affichée.	16
2.3	Mesure pupillaires en fonction de la luminosité	19
2.4	Luminance globale du simulateur en fonction de la nuance de gris affichée. .	28
2.5	Luminance de la cible (en cd/m^2) en fonction de sa nuance de gris et de la nuance de gris du fond.	29

Première partie

Partie expérimentale : contraste & 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 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 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-

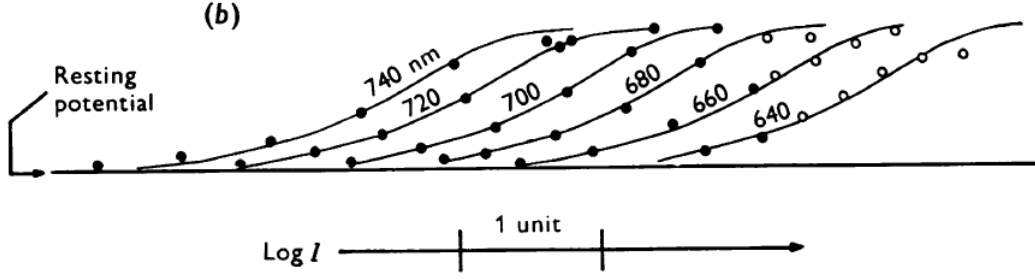


FIGURE 1.1 – Illustration de l'effet de compression. Image tirée de [Naka & Rushton, 1966]

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 décrémente) puis une autre série de mesures avec des cibles plus claires que le fond de présentation (méthode incrémentale).

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 lumineux artificiel directement au niveau de l'œil (Fig. 1.2).

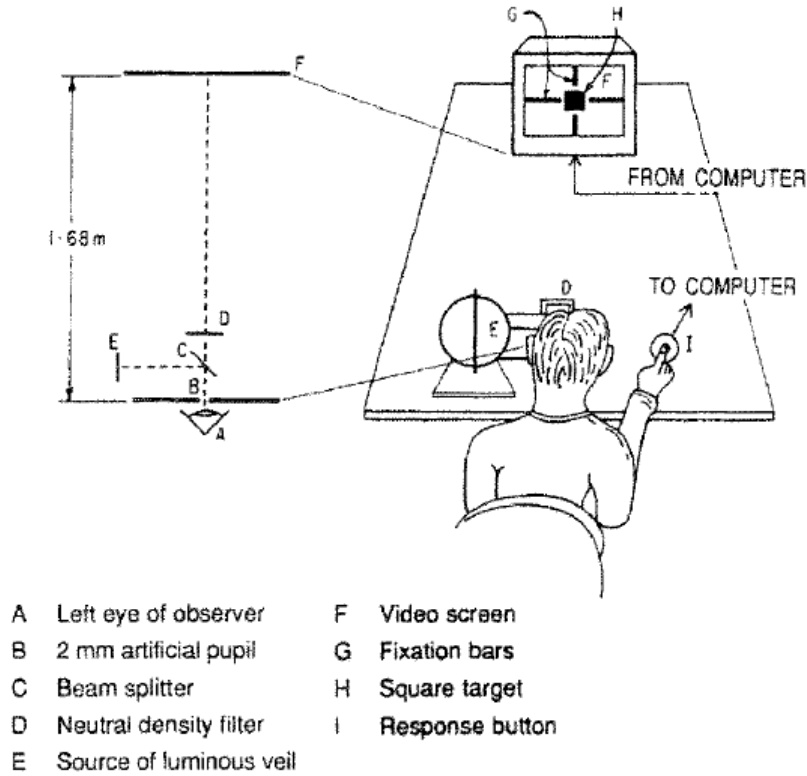


FIGURE 1.2 – Installation de l’experimentation de Rea et Ouellette. Image tirée de [Rea & Ouellette, 1988]

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 280×10^{-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 ΔT_{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 ΔT_{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 gris normalisé, c'est à dire variant de 0 (= 0/255) à 1 (= 255/255).

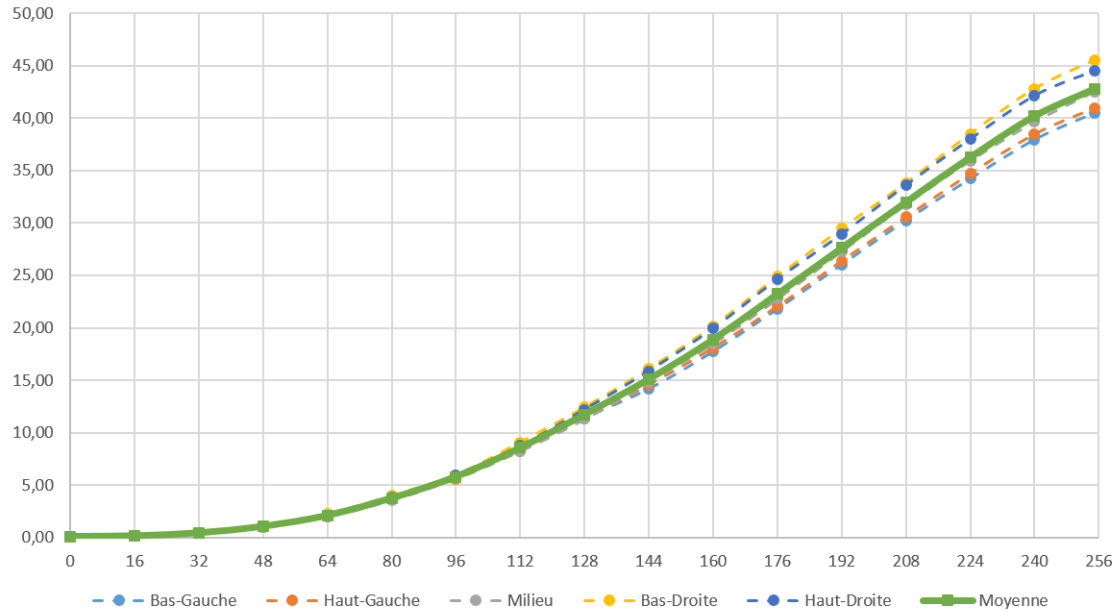


FIGURE 2.2 – Evolution de la luminance en fonction du niveau de gris sur les cinq points de mesure et leur moyenne.

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

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.

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

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

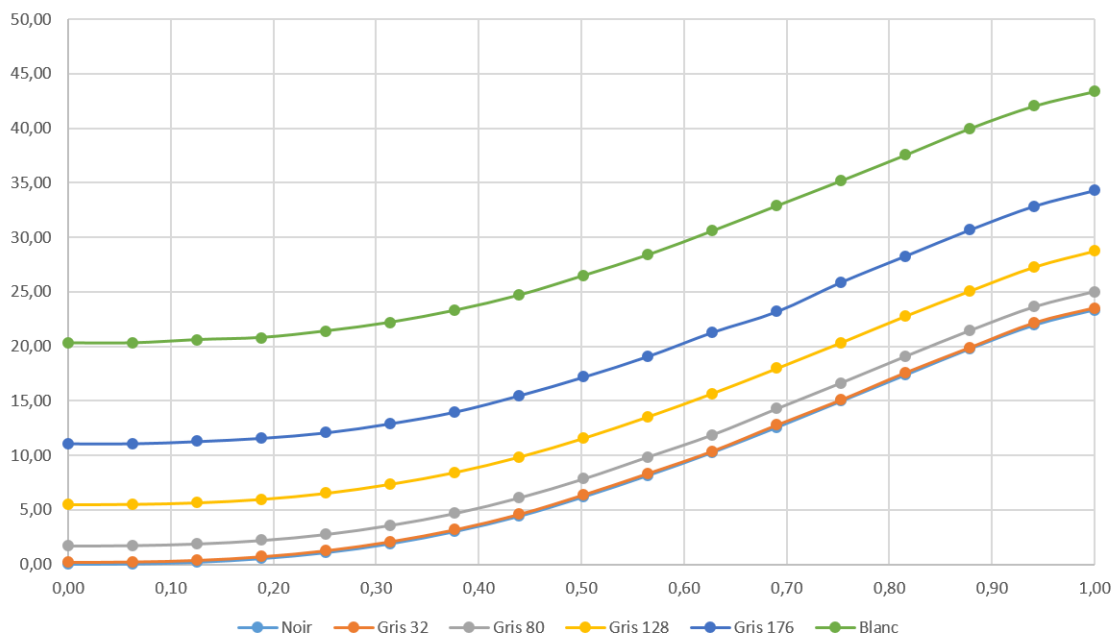


FIGURE 2.3 – Luminance de la cible en fonction de la luminance globale

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.

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



FIGURE 2.4 – Oculomètre Dikablis Professional

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 Professional¹ (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.

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

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.

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

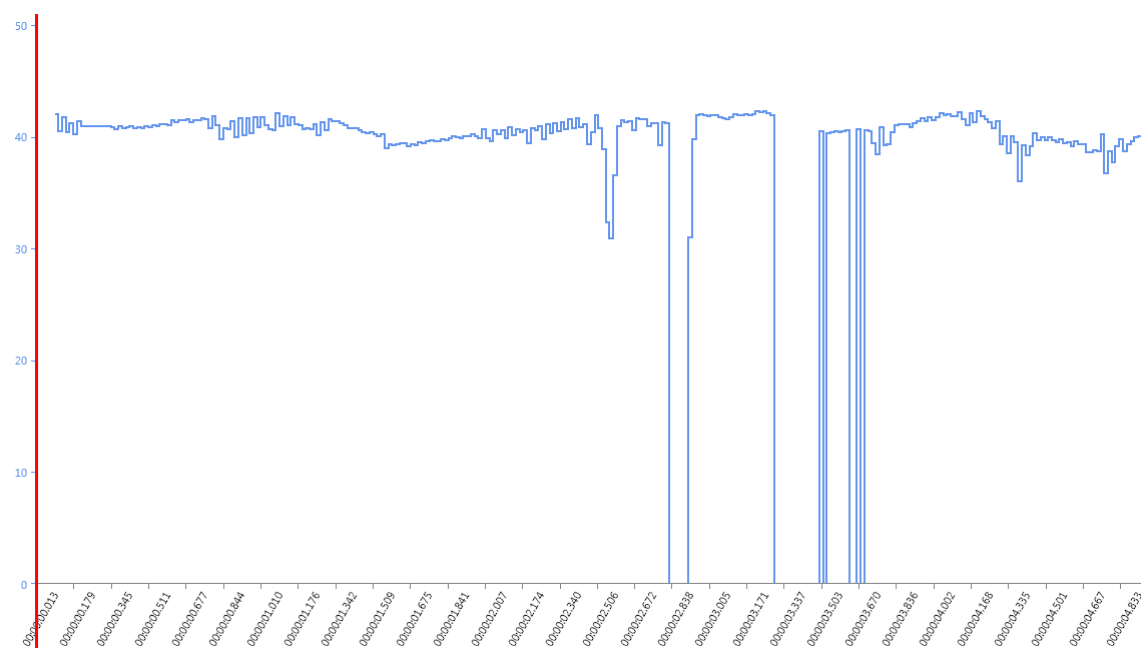


FIGURE 2.5 – Exemple d’une mesure en pixel de largeur pupillaire au cours du temps.

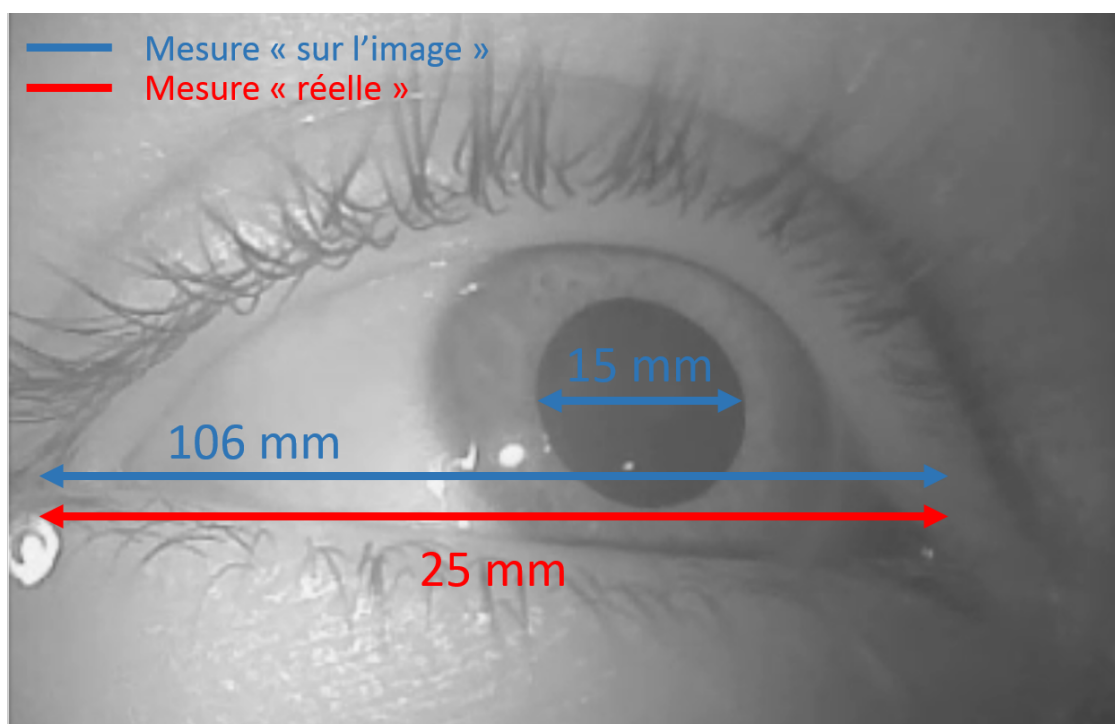


FIGURE 2.6 – Mesures pour la conversion pixel/mm.

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

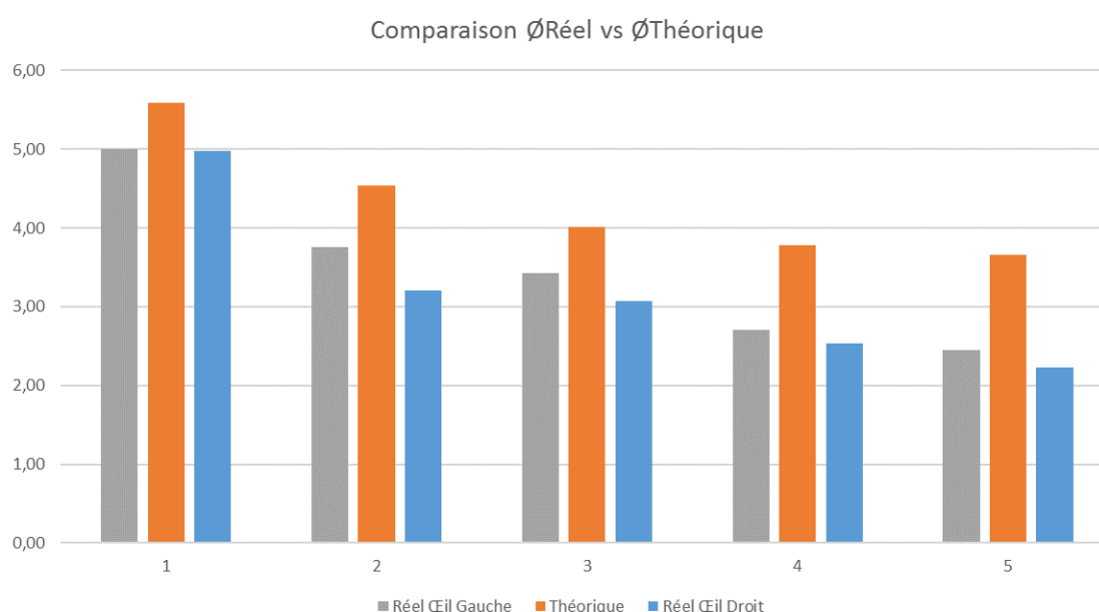


FIGURE 2.7 – Comparaison entre les mesures de diamètre pupillaire par rapport aux valeurs théoriques fonction de la luminance affichée.

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.

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.

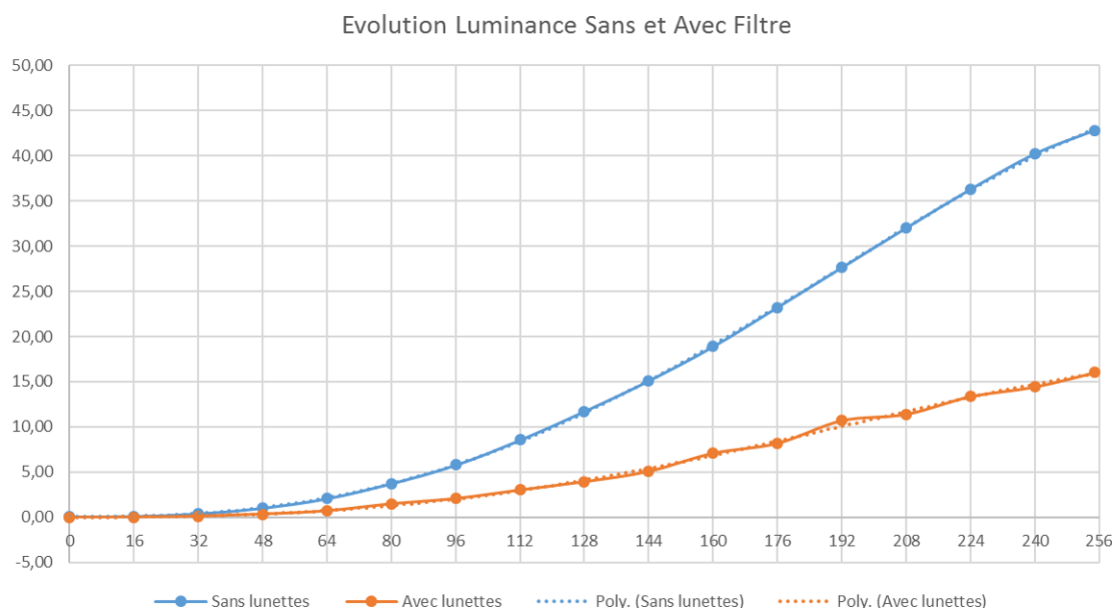


FIGURE 2.8 – Comparaison des mesures sans et avec filtre des lunettes stéréoscopiques.

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.

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,

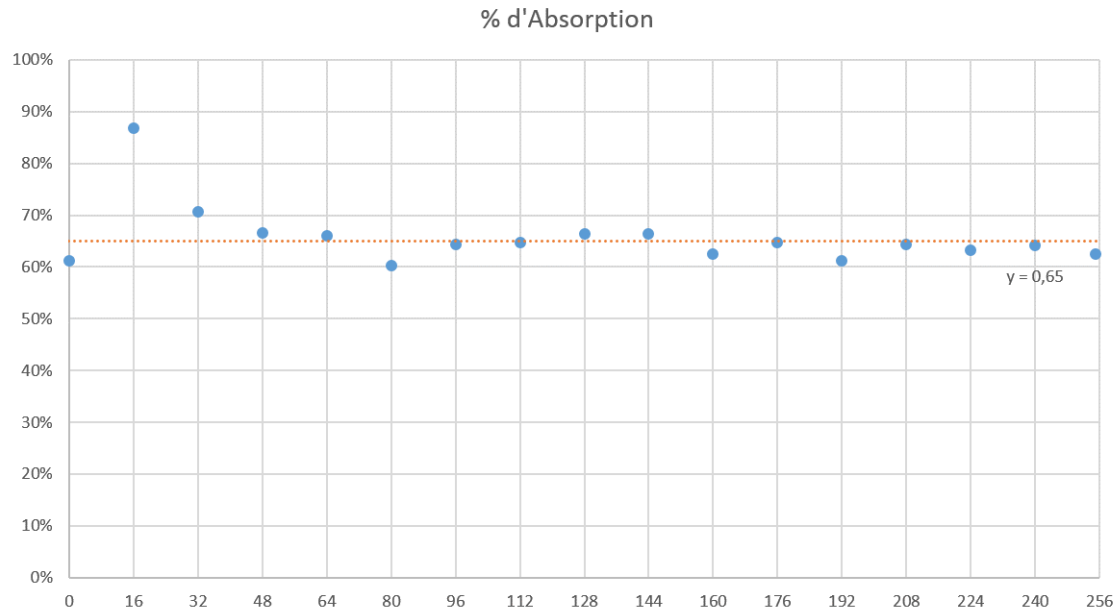


FIGURE 2.9 – Pourcentage d'absorption en fonction du niveau de gris affiché.

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.

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 ω 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 $C_{t,d}$

$$\begin{cases} A = \log_{10} [\tanh(20000 \omega)] \\ L = \log_{10} \left[\log_{10} \left(\frac{10 I_R}{\pi} \right) \right] \\ I_R = L_A \pi r^2 \end{cases} \quad (2.6)$$

$$\log_{10}(C_{t,d}) = -1.36 - 0.179 A - 0.813 L + 0.226 A^2 - 0.0772 L^2 + 0.169 A L \quad (2.7)$$

Calcul de la constante de semi-saturation K

$$\begin{cases} A^* = \log_{10} [\tanh(5000 \omega)] \\ L^* = \log_{10} \left[\tanh \left(\frac{0.04 I_R}{\pi} \right) \right] \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\log_{10}(K) = -1.76 - 0.175 A^* - 0.0310 L^* + 0.112 A^{*2} + 0.171 L^{*2} + 0.0622 A^* L^* \quad (2.9)$$

Calcul de la réponse maximale R_{max}

$$R_{max} = 0.000196 \log_{10}(I_R) + 0.00270 \quad (2.10)$$

Calcul de la performance R

$$\begin{cases} C_V = \frac{T|L_b - L_t|}{L_a} \\ \Delta C_d = |C_V - C_{t,d}| \end{cases} \quad (2.11)$$

$$R = \frac{(\Delta C_d)^{0.97}}{(\Delta C_d)^{0.97} + K^{0.97}} \quad (2.12)$$

Ajout de l'influence de l'âge

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

Réduction de l'illumination rétinienne

$$\begin{cases} P = 1 - 0.017 (a - 20) \\ 2r = 4.77 - 2.44 \tanh[0.3 \log_{10}(L_a)] \end{cases} \quad (2.13)$$

$$I'_R = P I_R = P L_A \pi r^2 \quad (2.14)$$

Réduction du contraste rétinien

$$\begin{cases} A = \log_{10} [\tanh(20000 \, \omega)] \\ L = \log_{10} \left[\log_{10} \left(\frac{10 \, I_R}{\pi} \right) \right] \\ \epsilon = 1 + \left[\frac{0.113}{45} (a - 20) \right] \end{cases} \quad (2.15)$$

$$\log_{10} \left(\frac{C'_{t,d}}{\epsilon} \right) = -1.36 - 0.179 \, A - 0.813 \, L + 0.226 \, A^2 - 0.0772 \, L^2 + 0.169 \, A \, L \quad (2.16)$$

MESURES DE LUMINANCE

Luminance de fond

TABLE 2.4 – 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 2.5 – Luminance de la cible (en cd/m^2) en fonction de sa nuance de gris et de la nuance de gris du fond.

Gris	Fond : 0	Fond : 32	Fond : 80	Fond : 128	Fond : 176	Fond : 255
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