

# **Recommandation UIT-R BT.2163-0**

## **(11/2023)**

Série BT: Service de radiodiffusion télévisuelle

**Algorithme de mesure objective pour  
l'évaluation de la brillance de la  
télévision à grande plage dynamique**



## Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

## Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en œuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

### Séries des Recommandations UIT-R

(Également disponible en ligne: <https://www.itu.int/publ/R-REC/en>)

Séries	Titre
<b>BO</b>	Diffusion par satellite
<b>BR</b>	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
<b>BS</b>	Service de radiodiffusion sonore
<b>BT</b>	<b>Service de radiodiffusion télévisuelle</b>
<b>F</b>	Service fixe
<b>M</b>	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
<b>P</b>	Propagation des ondes radioélectriques
<b>RA</b>	Radio astronomie
<b>RS</b>	Systèmes de télédétection
<b>S</b>	Service fixe par satellite
<b>SA</b>	Applications spatiales et météorologie
<b>SF</b>	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
<b>SM</b>	Gestion du spectre
<b>SNG</b>	Reportage d'actualités par satellite
<b>TF</b>	Émissions de fréquences étalon et de signaux horaires
<b>V</b>	Vocabulaire et sujets associés

*Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.*

Publication électronique  
Genève, 2024

© UIT 2024

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

## RECOMMANDATION UIT-R BT.2163-0

**Algorithme de mesure objective pour l'évaluation de la brillance de la télévision à grande plage dynamique<sup>1,2</sup>**

(Question UIT-R 142-3/6)

(2023)

**Champ d'application**

La présente Recommandation définit un algorithme de mesure permettant de déterminer le niveau d'image, sur la base de la luminance moyenne de l'image, qui peut être utile pour évaluer la brillance d'images données. D'autres mesures, fondées sur le niveau d'image, correspondent au niveau d'image dans le temps et à la réponse au niveau d'image, qui peuvent être utiles pour modéliser la réponse du système de vision humaine à une séquence d'images.

**Mots clés**

Mesures vidéo, brillance, production télévisuelle, grande plage dynamique, HDR, télévision, TV-HDR, échange international de programmes

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que la télévision à grande plage dynamique (TV-HDR) offre une plage dynamique extrêmement large de niveaux de luminance de l'image;
- b) que les sauts importants de brillance peuvent être surprenants pour les téléspectateurs;
- c) que le contrôle de la brillance de l'image permet de mieux comprendre l'expérience du téléspectateur;
- d) que l'état de l'adaptation du système visuel humain est affecté par la séquence temporelle des images;
- e) que la Recommandation UIT-R BT.2100 contient les spécifications de deux formats de TV-HDR, à savoir le format de la quantification perceptuelle (PQ) et le format hybride log-gamma (HLG), et qu'il est prévu de produire des programmes dans ces deux formats;
- f) qu'une luminance de crête nominale de 1 000 cd/m<sup>2</sup> est généralement utilisée pour les écrans de référence HLG;
- g) que les conditions de la zone environnante de référence sont précisées dans le Tableau 3 de la Recommandation UIT-R BT.2100;
- h) que les méthodes de mesure vidéo existantes employées dans la production ne donnent pas de valeur numérique représentant la brillance subjective des images;

---

<sup>1</sup> La présente Recommandation ne remplace pas les lignes directrices figurant dans la Recommandation UIT-R BT.1702, qui visent à protéger la partie de la population vulnérable à l'épilepsie photosensible et qui risquent donc de subir des crises d'épilepsie déclenchées par des flashes lumineux, notamment ceux associés à certains types d'images de télévision.

<sup>2</sup> Il faudra peut-être revoir les algorithmes une fois que des essais auront été menés sur une plus grande variété d'images en mouvement et lorsque ces algorithmes feront l'objet d'essais conjointement avec une spécification de mesure qui est actuellement en cours de mise au point.

i) que, pour faciliter l'évaluation de la brillance subjective des vidéos des programmes, les méthodes de mesure normalisées sont utiles,

*reconnaissant*

que l'utilisation de ces algorithmes visera à compléter plutôt qu'à remplacer le contrôle de forme d'onde conventionnel,

*recommande*

1 lorsqu'une mesure de la brillance subjective d'une image à grande plage dynamique, produite conformément à la Recommandation UIT-R BT.2100, est nécessaire pour faciliter la production et l'échange de programmes, de pouvoir utiliser l'algorithme de niveau d'image défini au § 1;

2 de pouvoir utiliser l'algorithme de mesure du niveau d'image dans le temps, défini au § 2, pour évaluer la contribution d'une séquence d'images à l'adaptation du téléspectateur;

3 de pouvoir utiliser l'approximation de la réponse de l'œil, à savoir la réponse au niveau d'image, définie au § 3, qui peut être utile pour évaluer l'importance des changements de brillance dans un programme,

*recommande en outre*

1 que la présente Recommandation ne soit pas utilisée comme un outil de régulation de la brillance, n'impose pas de restrictions aux opérateurs et ne limite pas la création de contenus;

2 qu'en raison de la vérification limitée des algorithmes avec des images en mouvement, l'UIT-R puisse souhaiter envisager de mettre à jour et d'améliorer rapidement la présente Recommandation.

## **1 Algorithme de mesure du niveau d'image**

Le présent paragraphe a pour objet de définir l'algorithme de mesure du niveau d'image (IL), qui peut être utile pour évaluer la brillance globale de l'image. L'algorithme IL est le fondement des autres mesures définies dans les §§ 2 et 3 de la présente Recommandation.

L'entrée de l'algorithme de mesure IL est un signal HLG ou PQ non linéaire défini dans la Recommandation UIT-R BT.2100,  $R'G'B'$ , situé dans l'intervalle [0:1].

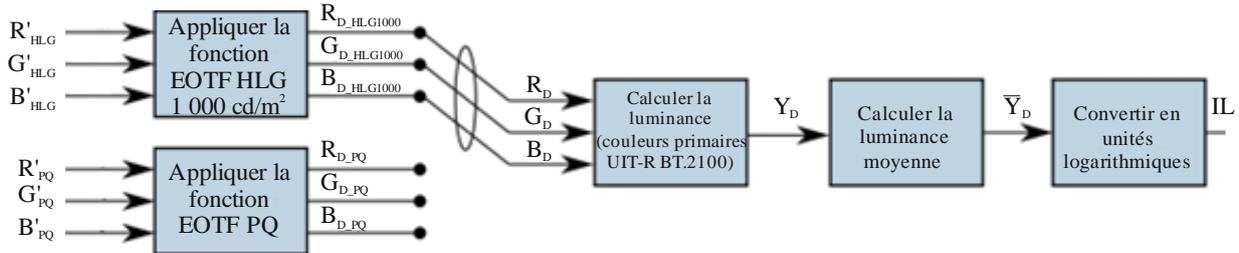
L'algorithme se décompose en quatre étapes:

- 1) conversion en une lumière linéaire à l'écran;
- 2) calcul de la composante de luminance;
- 3) calcul de la luminance de l'écran moyenne;
- 4) conversion en unités logarithmiques.

La Figure 1 est un schéma fonctionnel de l'algorithme.

FIGURE 1

Schéma fonctionnel de l'algorithme de mesure du niveau d'image



BT.2163-01

### 1.1 Conversion en lumière linéaire à l'écran

Pour les signaux HLG  $R'_{HLG}, G'_{HLG}, B'_{HLG}$ , la fonction EOTF HLG spécifiée dans le Tableau 5 de la Recommandation UIT-R BT.2100 est appliquée, en utilisant une valeur de 1,2 pour  $\gamma$  comme indiqué dans la Note 5f du Tableau 5 de la Recommandation UIT-R BT.2100 pour un écran dont la luminance nominale de crête est de 1 000  $\text{cd/m}^2$ . Le signal obtenu est la lumière linéaire à l'écran  $R_D G_D B_D$  située dans l'intervalle  $[0:1\ 000]$   $\text{cd/m}^2$ .

Pour les signaux PQ  $R'_{PQ}, G'_{PQ}, B'_{PQ}$ , la fonction EOTF PQ spécifiée dans le Tableau 4 de la Recommandation UIT-R BT.2100 est appliquée. Le signal obtenu est la lumière linéaire à l'écran  $R_D G_D B_D$  située dans l'intervalle  $[0:10\ 000]$   $\text{cd/m}^2$ .

Le signal de la lumière linéaire à l'écran de la composante est dénommé ci-après  $R_D G_D B_D$ , que le signal émis soit un signal HLG ou PQ.

### 1.2 Calcul de la composante de luminance

Le signal de luminance affichée linéaire  $Y_D$  est calculé à l'aide de l'équation suivante:

$$Y_D = 0,2627R_D + 0,6780G_D + 0,0593B_D$$

Une méthode d'approximation est décrite dans l'Annexe 1.

### 1.3 Calcul de la luminance de l'écran moyenne

La luminance de l'écran moyenne  $\bar{Y}_D$  de la trame vidéo, en unités de  $\text{cd/m}^2$ , est alors calculée.

$$\bar{Y}_D = \frac{1}{H \times V} \sum_{h=0}^{H-1} \sum_{v=0}^{V-1} Y_D(h, v)$$

où:

$Y_D(h, v)$ : luminance affichée linéaire de la valeur du pixel en position horizontale  $h$  et en position verticale  $v$

$H$ : nombre de pixels horizontaux

$V$ : nombre de pixels verticaux.

### 1.4 Conversion en unités logarithmiques

La luminance à l'écran moyenne en  $\text{cd/m}^2$  est convertie en unités logarithmiques de base 2, avec une valeur de normalisation de 1  $\text{cd/m}^2$ .

NOTE – Une luminance à l'écran moyenne de 1  $\text{cd/m}^2$  produit une valeur IL de zéro.

$$IL = \log_2 \frac{\bar{Y}_D}{1}$$

Des recherches de fond sur cet algorithme sont décrites dans l'Annexe 2.

## 2 Algorithme de niveau d'image dans le temps

Le visionnage d'une séquence d'images affecte l'état d'adaptation d'un observateur humain et donc les incidences perçues du niveau d'image. Le niveau d'image dans le temps (TIL)<sup>3</sup> peut être utile pour évaluer la brillance de l'image au fil du temps. Le niveau TIL est calculé comme suit:

$$TIL(t) = \begin{cases} IL(t) & \text{si } t = 0 \\ TIL(t-1) \left(1 - \frac{1}{\tau+1}\right) + IL(t) \left(\frac{1}{\tau+1}\right) & \text{si } t > 0 \end{cases}$$

où  $t$  est le nombre de trames en commençant par 0, et  $\tau$  est le temps de décroissance caractéristique, une constante qui est définie aux valeurs suivantes:

$$p(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t = 0 \\ IL(t) - TIL(t-1) & \text{si } t > 0 \end{cases}$$

$$\tau = \begin{cases} 22 \frac{f}{24} & \text{si } p(t) \geq 0 \\ 800 \frac{f}{24} & \text{si } p(t) < 0 \end{cases}$$

où:

$f$ : fréquence d'images (en Hz) de la vidéo.

Le calcul de la forme fonctionnelle du niveau TIL est présenté dans l'Annexe 3, et les choix de la valeur du temps de décroissance sont décrits dans l'Annexe 4.

## 3 Algorithme de réponse du niveau d'image

On utilise la réponse du niveau d'image (ILR) pour modéliser la réponse du système de vision humaine à la luminance d'une image. Elle peut être utile pour évaluer le niveau instantané de gêne du téléspectateur qui résulte des changements de niveau d'image, par exemple lors d'un changement de plan. Elle ne modélise pas la décroissance de la gêne subjective à la suite d'un changement de brillance. Cependant, elle peut constituer une entrée utile pour les appareils de mesure qui, lorsqu'ils sont combinés à d'autres mesures spécifiées dans le présent document, pourraient modéliser cette décroissance. Elle dépend à la fois de la luminance de l'image et du niveau d'adaptation de l'œil. Dans un environnement de référence décrit dans la Recommandation UIT-R BT.2100, on peut donner une approximation de cette réponse à l'aide des quantités IL et TIL comme suit:

$$ILR = \frac{(2^{IL})^{n_c}}{(2^{IL})^{n_c} + (2^{TIL})^{n_c}}$$

où:

$ILR$ : réponse approchée du système de vision humaine

$n_c$ : constante égale à 0,57.

<sup>3</sup> L'algorithme TIL a été vérifié uniquement dans des conditions limitées avec essentiellement des contenus d'images statiques comme ceux décrits dans l'Annexe 4. Il faudra peut-être revoir l'algorithme TIL une fois que des essais auront été menés sur une plus grande variété d'images en mouvement.

## Annexe 1 (informative)

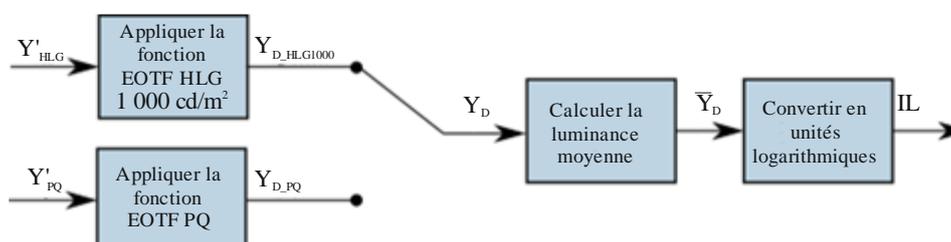
### Approximation du calcul de la luminance à l'écran pour une mise en œuvre matérielle simplifiée

On trouvera dans la présente Annexe une méthode d'approximation pour calculer la composante de luminance à l'écran,  $Y_D$ , qui simplifie la mise en œuvre de l'algorithme IL décrit dans le paragraphe 1. Dans le cas où les ressources matérielles sont limitées, cette méthode pourrait être appliquée aux dispositifs qui sont utilisés pour une aide visuelle uniquement. Les couleurs saturées pourraient donner lieu à des valeurs de mesure plus faibles en utilisant cette approximation. Les appareils appliquant cette méthode ne conviendraient pas pour une analyse numérique des valeurs IL, et n'auraient donc pas besoin d'enregistrer les valeurs IL.

La Figure 2 est un schéma fonctionnel de l'algorithme d'approximation. Son entrée est un signal de luminance HLG ou PQ non linéaire,  $Y'$ , compris dans l'intervalle [0:1]. Si le signal est  $ICTCP$ , le signal  $I$  peut être utilisé à la place de  $Y'$  dans le schéma ci-dessous.

FIGURE 2

Schéma fonctionnel de l'algorithme d'approximation de mesure du niveau IL



BT.2163-02

#### Conversion en approximation de la lumière à l'écran linéaire<sup>4</sup>

Pour les signaux HLG  $Y'_{HLG}$ , la fonction HLG EOTF spécifiée dans le Tableau 5 de la Recommandation UIT-R BT.2100 est appliquée directement à  $Y'_{HLG}$ , en utilisant une valeur de 1,2 pour  $\gamma$  comme indiqué dans la Note 5f du Tableau 5 de la Recommandation UIT-R BT.2100 pour un écran dont la luminance de crête nominale est de 1 000  $\text{cd/m}^2$ . Le signal obtenu est une approximation de la lumière linéaire à l'écran  $Y_{D\_HLG}$  dans l'intervalle [0:1 000]  $\text{cd/m}^2$ .

Pour les signaux PQ  $Y'_{PQ}$ , la fonction EOTF PQ spécifiée dans le Tableau 4 de la Recommandation UIT-R BT.2100 est appliquée directement à  $Y'_{PQ}$ . Le signal obtenu est une approximation de la lumière linéaire à l'écran  $Y_{D\_PQ}$  dans l'intervalle [0:10 000]  $\text{cd/m}^2$ .

L'approximation du signal de la lumière à l'écran linéaire approximatif est désignée  $Y_D$ , que le signal émis soit un signal HLG ou PQ.

La valeur approchée de  $Y_D$  est alors utilisée dans les calculs restants décrits dans les § 1.2 et 1.3.

<sup>4</sup> Veuillez noter que, pour calculer avec exactitude la luminance à l'écran, les fonctions EOTF figurant dans la Recommandation UIT-R BT.2100 sont appliquées aux composantes du signal  $R'G'B'$ , et pas à la composante de luminance décrite ici.

## Annexe 2 (informative)

### Éléments de mesure objectifs pour la mesure de la brillance dans la télévision à grande plage dynamique

La présente Annexe vise à décrire les recherches de fond qui ont servi à l'élaboration de l'algorithme du niveau d'image décrit dans le § 1. Une vue d'ensemble des travaux connexes est présentée, avant de décrire des essais subjectifs dans le cadre desquels on utilise des valeurs établies comme des données de brillance pour un ensemble d'images d'essai. Ces valeurs sont ensuite utilisées pour mener des essais sur un certain nombre d'éléments de mesure objectifs permettant de mesurer la brillance des images.

#### Travaux connexes

De nombreux travaux ont été menés sur la perception et l'adaptation de la brillance, comme indiqué dans le Livre blanc 341 de la BBC [1].

#### Expérience consistant à définir des valeurs de brillance pour des images d'essai

Le terme *brillance* désigne «la mesure dans laquelle une zone dégage de la lumière» ([2], p. 69). Elle se distingue de la *luminosité*, qui se rapporte à la réflexion apparente d'un objet, quelle que soit la façon dont il est éclairé ([2], p. 70). La brillance est une valeur subjective qui ne peut être mesurée directement; par conséquent, une méthode d'essai subjectif est mise au point pour créer un ensemble de mesures de la brillance de référence de base. L'objectif est de créer un indicateur de brillance objectif correspondant aussi étroitement que possible aux résultats subjectifs et fondé sur les valeurs de luminance affichée.

Il a été demandé aux participants aux essais d'ajuster la brillance d'une dalle grise jusqu'à ce qu'elle corresponde à la brillance globale perçue d'une image d'essai. La luminance de la dalle grise est connue et peut être utilisée comme une valeur numérique représentative de la brillance de l'image. Les participants avaient la possibilité de basculer librement entre l'image d'essai et la dalle grise et pouvaient prendre tout le temps qu'ils souhaitaient.

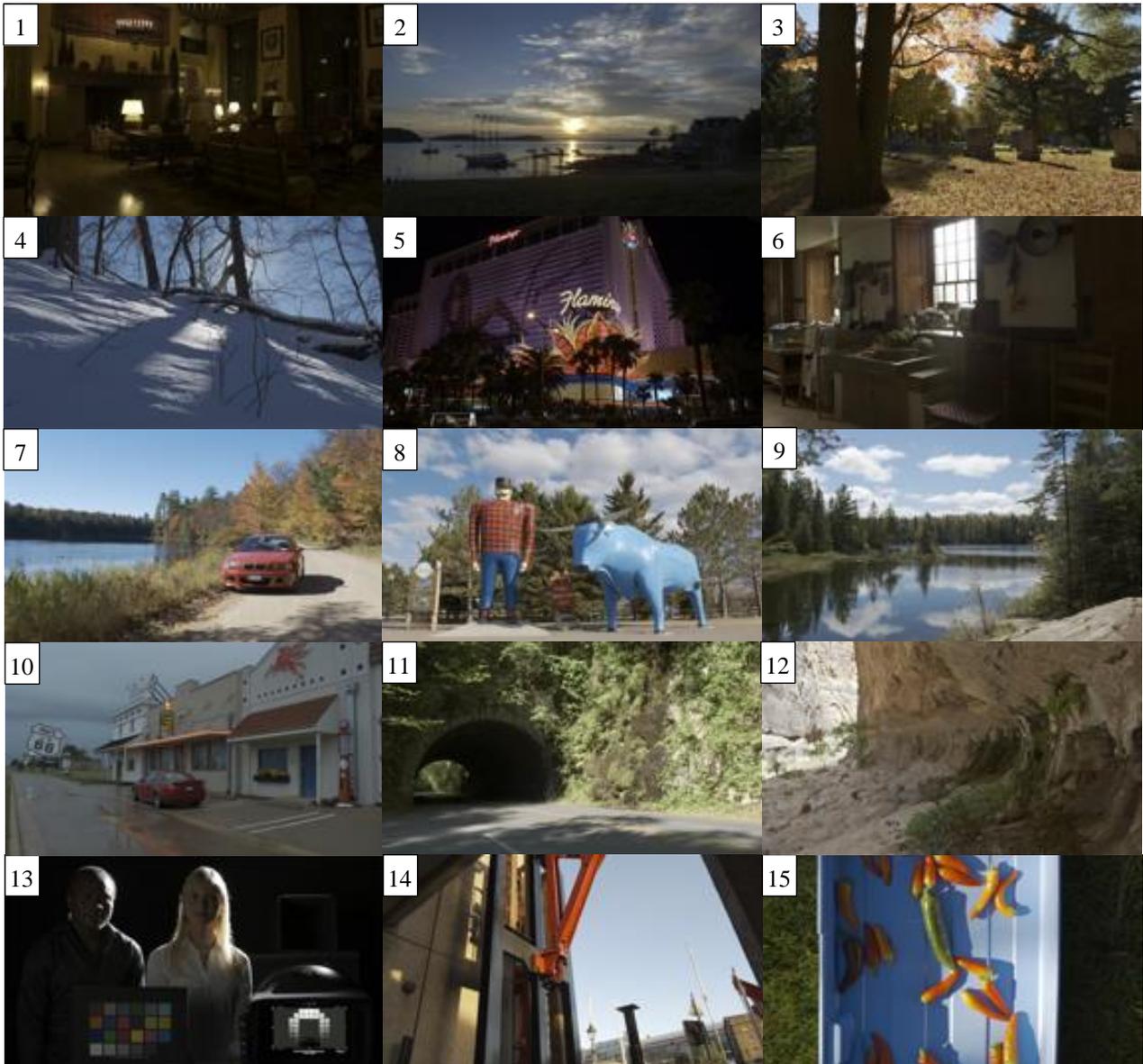
L'image d'essai et la dalle grise ont été présentées sur un écran SIM2 HDR47E en utilisant son mode LogLUV calibré. Les niveaux de la dalle étaient compris entre 0 et 4 000 cd/m<sup>2</sup>, avec 400 paliers suivant une fonction exponentielle de façon à ce que la taille du palier soit de  $3,9 \times 10^{-10}$  cd/m<sup>2</sup> au niveau du noir et de 50 cd/m<sup>2</sup> à l'extrémité supérieure. Comme pour tous les écrans LCD, lors de l'affichage en mode plein écran dans une seule couleur, le SIM2 n'est pas en mesure d'afficher avec précision la brillance d'entrée, surtout à des niveaux de luminance élevés. Les valeurs de la luminance effective de l'écran pour les niveaux de la dalle d'entrée à des intervalles de 10 cd/m<sup>2</sup> ont été enregistrées et ont mis en correspondance les valeurs de la dalle grise prévues avec ces valeurs mesurées (interpolées si nécessaire) avant la présentation des résultats. Deux lumières LED ajustables illuminaient le mur derrière l'écran, pour faire en sorte que la lumière réfléchi par le mur corresponde à un blanc D65 à 5 cd/m<sup>2</sup>. Les lumières étaient placées derrière l'écran et orientées en direction du mur, afin de réduire au maximum la lumière retombant directement sur l'écran. La pièce ne comportait aucune autre source de lumière. La configuration de la salle prévue pour les essais est présentée dans la Fig. 3.

FIGURE 3

Configuration de la salle prévue pour les essais



FIGURE 4  
Images utilisées pour les essais



Note de la Fig. 4: Les images 1 à 12<sup>5</sup> sont tirées de [3], l'image 13 de [4]<sup>6</sup> et les images 14 et 15 ont été créées par la R&D de la BBC.

L'entrée LogLUV de l'écran SIM2 ne dispose pas d'une commande de la brillance. Par conséquent, il n'est pas possible d'utiliser un signal PLUGE ordinaire pour calibrer le niveau noir. Un ensemble de signaux de test générés spécialement qui incluait du sous-noir et du super-noir dans une gamme de niveaux de noir a donc été utilisé pour trouver le décalage nécessaire, et ce décalage a été ajouté aux images d'essai avant leur affichage. Le décalage de niveau de noir s'avère être de  $0,005 \text{ cd/m}^2$ . Il s'agit d'une valeur plus faible que ce qui serait attendu si les lumières étaient positionnées devant plutôt que derrière l'écran.

<sup>5</sup> Ces images sont reproduites avec l'autorisation de Mark Fairchild.

<sup>6</sup> Cette image est reproduite avec l'autorisation de la Grande école des médias de Stuttgart.

Quinze images sont utilisées dans cette étude et présentées dans la Fig. 4. Les 12 premières images sont extraites de l'étude photographique sur la grande plage dynamique de Mark Fairchild [3], et ont été complétées par une image (numéro 13) de la Grande école des médias de Stuttgart [4] et deux images créées par la R&D de la BBC (numéros 14 et 15). Étant donné que la plage dynamique des images brutes était plus grande que ce qui était attendu pour une utilisation dans le cadre de la TV-HDR, les images sont redimensionnées pour paraître plus esthétiques (comme en ont jugé un petit nombre d'observateurs expérimentés) avec une plus petite plage dynamique. Cela équivaut à ajuster le diaphragme de l'appareil photo. Le jeu d'essai incluait des images claires et sombres, et plusieurs images sur lesquelles figuraient des zones à la fois éclairées et ombragées. Les images ont été converties dans des couleurs primaires décrites dans les Recommandations UIT-R BT.2100/BT.2020 et présentées dans une résolution de 1 920×1 080 pixels pour que cela corresponde à la résolution maximale de l'écran.

Chaque image est affichée à quatre niveaux de luminance de crête de l'écran (500, 1 000, 2 000 et 4 000 cd/m<sup>2</sup>), en utilisant une approche basée sur une scène d'échelonnement de la luminance. Une fonction gamma adaptée à la luminance de crête de l'écran a été appliquée, conformément à la Note 5f du Tableau 5 de la Recommandation UIT-R BT.2100. Il s'agit simplement d'une méthode d'accroissement de la gamme des brillances utilisées pendant les essais qui ne limite pas l'applicabilité des résultats aux systèmes basés sur une scène.

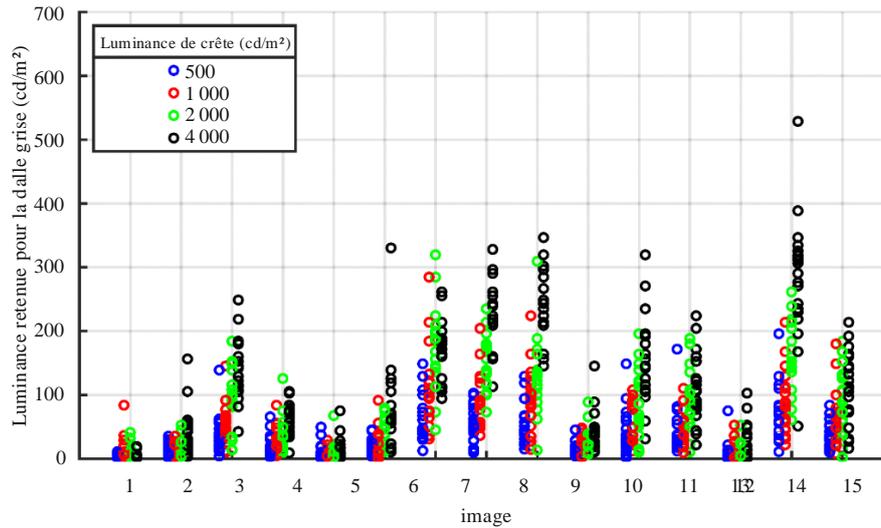
Les participants étaient assis à une distance de 1,9 m de l'écran, une distance correspondant à 3,2 fois la hauteur de l'écran. Chaque participant a fait l'objet d'un examen préalable aux essais permettant de vérifier qu'il disposait d'une acuité visuelle normale, avant de recevoir des instructions écrites. Deux images d'entraînement ont été fournies, et trois images «factices» ont été intégrées au début des essais. Les résultats pour les images d'entraînement et les images factices ont été supprimés. Les images ont été présentées dans un ordre aléatoire différent pour chaque participant, et il a été pris soin de faire en sorte que la même image (d'une brillance différente) n'apparaisse jamais deux fois de suite. Vingt personnes ont participé aux essais.

### **Résultats de l'expérience visant à établir des valeurs de brillance pour des images d'essai**

La Figure 5 présente les différentes réponses données par les 20 participants à l'essai, pour chaque image aux différents niveaux de luminance de crête de l'écran. Il convient de noter que les images peuvent ne pas toutes présenter des niveaux de brillance subjective différents, même à des niveaux de luminance de crête de l'écran différents. Par exemple, l'image d'essai 1 (voir la Fig. 4) est majoritairement sombre, avec quelques zones très claires. Lorsque la luminance de l'écran augmente, on constate que la différence subjective la plus marquée concerne la brillance perçue des zones claires, et la brillance globale de cette image peut donc ne pas être affectée par un changement de la luminance de crête de l'écran si le niveau de brillance d'une petite zone claire n'est pas important du point de vue de la perception. C'est exactement le type d'effet qu'il faut étudier afin de mettre au point un indicateur efficace de la brillance. Néanmoins, les résultats montrent que, d'une façon générale, les images apparaissent comme plus lumineuses à mesure que la luminance de crête de l'écran augmente, et on constate un étalement concernant les images claires et les images sombres du jeu d'images utilisé pour l'essai.

FIGURE 5

Niveaux de luminance de la dalle grise retenus par les participants individuels à l'essai, en fonction de l'image et de la luminance de crête de l'écran. Chaque cercle correspond à l'évaluation de l'image par un participant



BT.2163-04

### Indicateurs objectifs

Aux fins de la présente étude, il a été mis au point des modèles qui relient les valeurs de luminance des pixels affichés aux valeurs de brillance globale perçue indiquées par les participants à l'essai. À terme, le modèle devra fonctionner avec des valeurs de signal plutôt qu'avec des niveaux de lumière affichée s'il doit être utilisé pour la surveillance du signal, mais à ce stade il reste indépendant du format de signal afin de pouvoir être appliqué à n'importe quelle image HDR.

Les images d'essai ont été stockées au format hybride log-gamma  $Y'C_b'C_r'$ , avec un sous-échantillonnage 4:2:2 des couleurs. Après avoir effectué un suréchantillonnage des composantes de différence de couleur et converti les images en  $R'G'B'$ , on a calculé les valeurs de luminance affichée conformément à la méthode indiquée dans le Tableau 5 de la Recommandation UIT-R BT.2100. On a supprimé en premier lieu la fonction de transfert opto-électronique HLG afin d'obtenir les signaux de la lumière linéaire de la scène ( $R_S G_S B_S$ ), puis on a appliqué la valeur gamma et une mise à l'échelle en fonction de la luminance de crête de l'écran afin de déterminer les composantes de couleur à l'écran ( $R_D G_D B_D$ ). Enfin, on a calculé les valeurs de luminance affichée à partir des composantes de couleur affichées, en utilisant les équations des Recommandations UIT-R BT.2100/BT.2020 applicables aux couleurs.

Les modèles ci-après permettent d'obtenir une valeur numérique correspondant à la brillance globale à partir des valeurs de luminance des pixels affichés pour les images d'essai. La luminance à l'écran pour un pixel donné est définie par l'expression ( $Y_D(i, j)$ ), où  $i$  et  $j$  sont les indices des pixels, et  $i \in 0: M - 1$  et  $j \in 0: N - 1$ . S'agissant des images d'essai utilisées ici,  $M = 1\ 080$  et  $N = 1\ 920$ .

- 1) Moyenne de la luminance de l'écran

$\frac{1}{MN} \sum_i \sum_j Y_D(i, j)$ . Ce modèle permet de calculer la moyenne de toutes les valeurs de luminance des pixels affichés, en tant qu'indicateur de référence.

- 2) Moyenne de la luminance de l'écran en logarithme décimal

$\frac{1}{MN} \sum_i \sum_j \log_{10}(Y_D(i, j))$ . D'après Fechner [5].

- 3) Moyenne de la fonction EOTF inverse en quantification perceptuelle (PQ) de la luminance de l'écran  

$$\frac{1}{MN} \sum_i \sum_j \text{EOTF}^{-1}(Y_D(i, j)),$$
 où  $\text{EOTF}^{-1}$  est telle que définie dans le Tableau 4 de la Recommandation UIT-R BT.2100.
- 4) Moyenne de la luminance de l'écran élevée à une puissance  

$$\frac{1}{MN} \sum_i \sum_j (Y_D(i, j))^p.$$
 D'après Stevens [6]. En l'espèce, les valeurs d'exposants testées vont de  $p = 0,2$  à  $p = 1$ .
- 5) Moyenne de la luminosité au sens de la Commission internationale de l'éclairage (CIE 1976)  

$$\frac{1}{MN} \sum_i \sum_j L^*(Y_D(i, j)),$$
 où  $L^*$  est telle que définie par la CIE [7], et comprend la section linéaire aux faibles niveaux de luminance. On utilise, en tant que blanc de référence, les valeurs de luminosité affichées correspondant à un niveau de signal de 75%, car il s'agit du niveau de référence qui a été défini pour les éléments graphiques HDR de type hybride log-gamma. Ces niveaux sont égaux à 120, 203, 344 et 581  $\text{cd/m}^2$  pour des niveaux respectifs de brillance de crête de 500, 1 000, 2 000 et 4 000  $\text{cd/m}^2$ .
- 6) Moyenne pondérée de la luminance de l'écran  

$$\frac{1}{MN} \sum_i \sum_j Y_D(i, j) \cdot \cos \theta_{ij} / \theta_{ij}^2,$$
 où  $\theta_{ij}$  est l'angle sous-tendu, au niveau de l'œil, entre le pixel  $(i, j)$  et le centre de l'écran, la valeur minimale de cet angle étant égale à  $0,75^\circ$ . Cet indicateur s'appuie sur Moon et Spencer [8]. La forme employée ici suppose que le spectateur fixe le centre de l'écran, et elle considère que tous les pixels sous-tendent le même angle au niveau de la rétine, ce qui permet d'omettre des constantes qui n'auraient pas d'effets sur les coefficients de corrélation.
- 7) Moyenne des valeurs au centre de l'écran  

$$\frac{4}{MN} \sum_{i=M/4}^{3M/4} \sum_{j=N/4}^{3N/4} Y_D(i, j).$$
 Ce modèle, qui est une version simplifiée de la pondération de Moon et Spencer, permet de calculer la luminance moyenne des pixels situés dans le quart central de l'écran uniquement.
- 8) Centiles  
 On appelle nième centile,  $P_n$ , le niveau de luminance en dessous duquel se situent  $n$  pour cent de tous les niveaux de luminance des pixels, dans une distribution des niveaux de luminance d'un écran. L'essai prend en compte les centiles de  $P_{10}$  à  $P_{100}$ .
- 9) Intervalles de centiles  
 Ce modèle calcule l'intervalle interquartile,  $P_{75} - P_{25}$ , et la différence entre le 90ème et le 10ème centile,  $P_{90} - P_{10}$ . Ces deux valeurs décrivent l'étalement des valeurs de luminance affichées.
- 10) Moyenne des valeurs sur un intervalle donné  
 Ce modèle calcule la luminance moyenne de l'écran en prenant en compte uniquement les valeurs situées entre  $P_{25}$  et  $P_{75}$ . L'essai considère également l'intervalle de  $P_{10}$  à  $P_{90}$ .

Les niveaux de gris retenus moyens pour les 60 images d'essai (15 images présentées à quatre brillances de crête, voir la Fig. 4) ont servi de valeurs de référence de base de la brillance lors de l'évaluation des modèles. Le paragraphe ci-après présente le coefficient de corrélation de Pearson et le coefficient de corrélation des rangs de Spearman entre chaque modèle et la référence de base.

### Corrélation entre les indicateurs objectifs et les résultats subjectifs

On trouvera dans le Tableau 1 les coefficients de corrélation de Pearson et les coefficients de corrélation des rangs de Spearman pour l'ensemble des indicateurs de brillance étudiés. Les résultats sont également présentés sous forme graphique dans les Figs 6 et 7.

L'indicateur le plus simple, la luminance affichée moyenne (indicateur 1), offre une très bonne correspondance, comme en témoigne le coefficient de corrélation de Pearson proche de 0,96. Les résultats obtenus pour cet indicateur sont présentés sur le graphique de gauche de la Fig. 8. Les diverses méthodes non linéaires de mise à l'échelle employées pour les indicateurs 2 à 5 ont pour seul effet de faire dévier les données par rapport à la droite obtenue pour l'indicateur 1; on peut constater cet effet pour l'indicateur 5 avec une valeur d'exposant égale à 0,33 (voir le graphique de droite de la Fig. 8), pour lequel une ligne courbe offrirait un meilleur ajustement. La seule exception concerne les valeurs de luminance des pixels, qui donnent lieu à une très légère amélioration par rapport à l'indicateur 1 quand on les élève à une puissance comprise entre 0,8 et 0,9 avant de calculer la moyenne (voir le graphique de gauche de la Fig. 7).

La moyenne pondérée de la luminance de l'écran (indicateur 6), qui tient compte du point fixé par les participants à l'essai, donne des résultats médiocres. De la même façon, la moyenne des valeurs au centre de l'écran (indicateur 7) est bien moins efficace que la simple moyenne de l'ensemble des valeurs. Ces résultats indiquent que les pixels près des bords de l'écran contribuent de manière importante à la brillance globale.

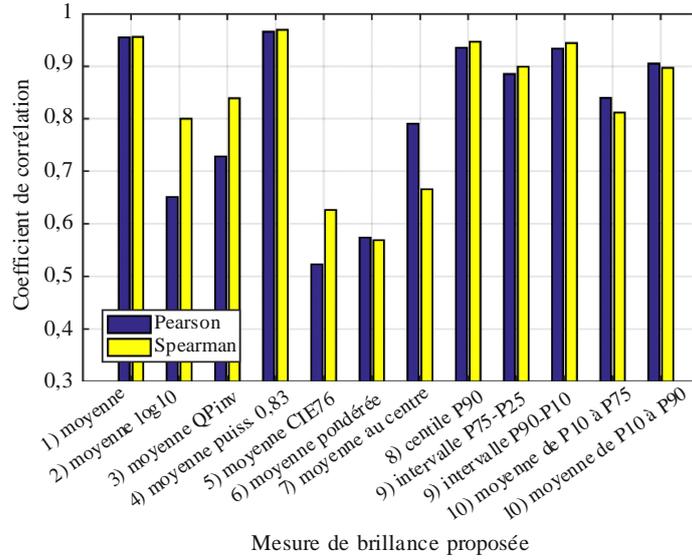
Les centiles inférieurs (indicateur 8) donnent des résultats très insuffisants, contrairement aux centiles supérieurs qui montrent une bonne corrélation avec les résultats d'essai subjectifs. Ce résultat suggère que la distribution de la luminance dans les parties les plus sombres de l'image n'est pas un facteur important dans la perception globale de la brillance, à l'inverse du niveau des parties les plus claires qui constitue un facteur significatif. On constate une chute de la corrélation au-delà du 90ème centile, ce qui implique que les très petites zones claires ont un effet moindre sur la brillance globale.

Les intervalles de centiles (indicateur 9) produisent des résultats analogues au centile qui constitue la borne supérieure de l'intervalle: ainsi, la corrélation pour l'intervalle  $P_{90} - P_{10}$  est analogue à celle obtenue pour  $P_{90}$  considéré seul, tandis que la corrélation pour l'intervalle  $P_{75} - P_{25}$  correspond à celle constatée entre  $P_{70}$  et  $P_{80}$ . La corrélation avec les résultats subjectifs est assez bonne pour les deux intervalles considérés. Toutes les images utilisées lors de l'essai contenaient des parties sombres, ce qui explique qu'en l'espèce, les intervalles de centiles ne donnent pas plus de renseignements que les centiles considérés individuellement.

La moyenne des valeurs sur un intervalle donné (indicateur 10) donne également des résultats assez satisfaisants. La plus forte corrélation est obtenue pour l'intervalle le plus large, c'est-à-dire celui qui se rapproche le plus de l'indicateur 1.

FIGURE 6

**Coefficients de corrélation pour tous les indicateurs étudiés.  
On a utilisé les paramètres offrant la plus forte corrélation pour les indicateurs 4 et 8**

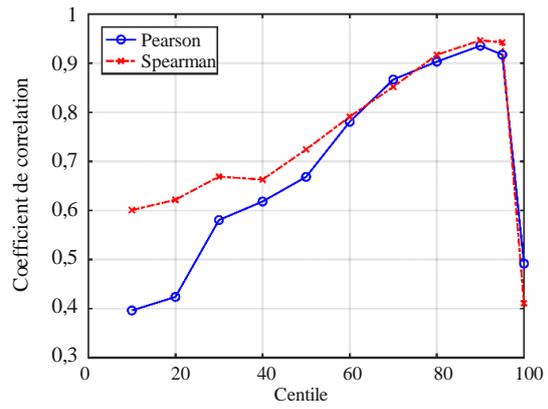
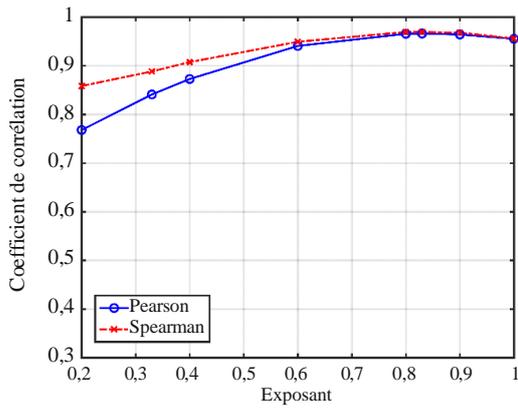


Mesure de brillance proposée

BT.2163-06

FIGURE 7

**Coefficients de corrélation pour l'indicateur 4, moyenne de la luminance des pixels affichés élevée à une puissance, pour des exposants allant de 0,2 à 1 (à gauche); et coefficients de corrélation pour l'indicateur 8, du centile 10 au centile 100 des valeurs de luminance des pixels affichés (à droite)**



BT.2163-07

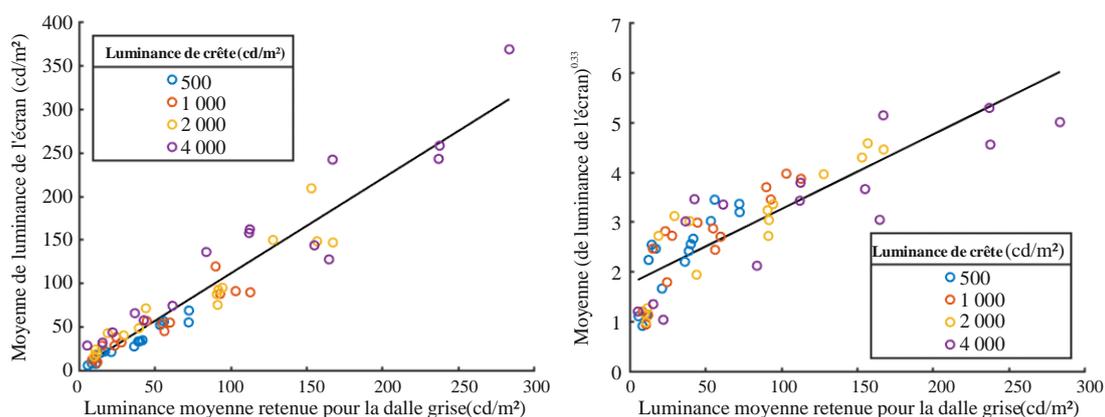
TABLEAU 1

**Coefficients de corrélation de Pearson et coefficients de corrélation des rangs de Spearman pour les indicateurs de brillance étudiés. La meilleure corrélation pour chaque partie du tableau est indiquée en gras**

Indicateur	Valeur du paramètre (le cas échéant)	Coefficient de corrélation de Pearson	Coefficient de corrélation des rangs de Spearman
1) Moyenne de la luminance de l'écran	–	<b>0,955378</b>	<b>0,955877</b>
2) Moyenne de la luminance de l'écran en log10	–	0,651608	0,800111
3) Moyenne de la fonction EOTF inverse QP de la luminance de l'écran	–	0,728708	0,839344
4) Moyenne de la luminosité au sens de la CIE 1976	–	0,523273	0,626341
5) Moyenne de la luminance de l'écran élevée à une puissance	0,2	0,767964	0,858405
	0,33	0,841025	0,888358
	0,4	0,872807	0,907530
	0,6	0,940758	0,949264
	<b>0,8</b>	0,965687	<b>0,969492</b>
	<b>0,83</b>	<b>0,966131</b>	0,969214
	0,9	0,964285	0,968158
6) Moyenne pondérée de la luminance affichée	–	0,573798	0,568769
7) Moyenne des valeurs au centre de l'écran	–	<b>0,791089</b>	<b>0,666296</b>
8) Centiles	$P_{10}$	0,395950	0,600389
	$P_{20}$	0,423570	0,621506
	$P_{30}$	0,580292	0,668797
	$P_{40}$	0,617995	0,662573
	$P_{50}$	0,668203	0,724034
	$P_{60}$	0,780425	0,790886
	$P_{70}$	0,866544	0,851570
	$P_{80}$	0,903016	0,916921
	<b><math>P_{90}</math></b>	<b>0,935327</b>	<b>0,946374</b>
	$P_{95}$	0,917317	0,942317
	$P_{100}$	0,491586	0,410593
9) Intervalles de centiles	$P_{75} - P_{25}$	0,885345	0,899194
	<b><math>P_{90} - P_{10}</math></b>	<b>0,934097</b>	<b>0,944540</b>
10) Moyenne des valeurs sur un intervalle donné	$P_{25}$ à $P_{75}$	0,839611	0,811892
	<b><math>P_{10}</math> à <math>P_{90}</math></b>	<b>0,905243</b>	<b>0,89686</b>

FIGURE 8

**Indicateur 1, moyenne de la luminance de l'écran (à gauche), et indicateur 5, moyenne de la luminance de l'écran élevée à la puissance 0,33 (à droite), en fonction de la luminance moyenne retenue pour la dalle grise (utilisée comme mesure de la brillance subjective, voir détails dans l'Annexe 2), pour chaque image d'essai**



BT.2163-08

## Conclusion

L'étude portait sur dix classes d'indicateurs objectifs de la brillance, qui mettaient en relation les valeurs de luminance des pixels affichés avec la brillance globale d'images. Des mesures antérieures de la brillance globale perçue pour un ensemble d'images HDR constituaient la référence de base pour l'évaluation des indicateurs étudiés.

L'indicateur qui produit les meilleurs résultats est celui qui consiste à élever les valeurs de luminance des pixels affichés à la puissance 0,83 avant d'en calculer la moyenne, mais cette méthode n'est que marginalement meilleure qu'une méthode plus simple qui calcule directement la moyenne des valeurs de luminance des pixels affichés. L'amélioration que l'on obtient en élevant d'abord les valeurs à une puissance est très faible, et elle est susceptible d'être située dans les limites de l'incertitude expérimentale; il est donc préférable d'employer la méthode plus simple dans les applications en temps réel. La corrélation élevée de 0,96 suggère que cet indicateur simple constituera une base efficace pour un dispositif de surveillance de la brillance.

## Références

- [1] Noland, K.C., Pindoria M. et Cotton, A., *Modelling Brightness Perception for High Dynamic Range Television*, Research & Development White Paper, 2019, p. 1, 2. Disponible à l'adresse: <http://downloads.bbc.co.uk/rd/pubs/whp/whp-pdf-files/WHP341.pdf>.
- [2] Hunt, R. W. G., *The Reproduction of Colour in Photography, Printing and Television*, 4ème édition, Fountain Press, 1987.
- [3] Fairchild, Mark, *The HDR Photographic Survey*, site web, <http://markfairchild.org/HDR.html>.
- [4] Fröhlich, J., Grandinetti, S., Eberhardt, B., Walter, S., Schilling, A. et Brendel, H., *Creating cinematic wide gamut HDR-video for the evaluation of tone mapping operators and HDR-displays*, Proc. SPIE 9023, Digital Photography X, 90230X, 7 mars 2014. Les images sont disponibles en ligne à l'adresse <https://www.hdm-stuttgart.de/vmlab/hdm-hdr-2014/>.
- [5] Fechner, G. T., *Elemente der Psychophysik*, Breitkopf und Härtel, 1860.
- [6] Stevens, S. S., *To Honour Fechner and Repeal His Law*, Science, vol. 133, N° 3446, p. 80-86, 1961.

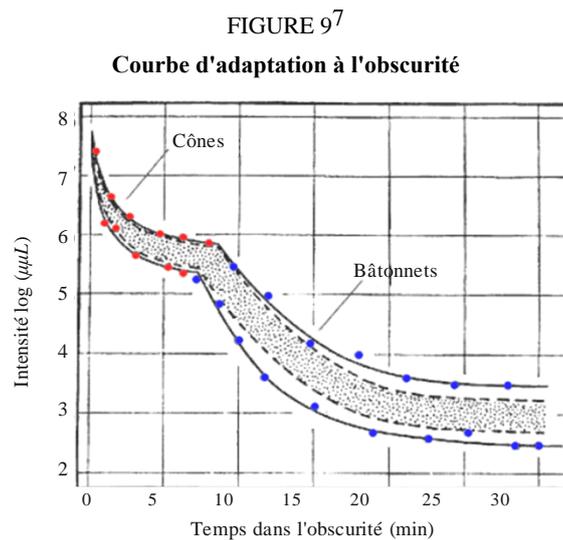
- [7] Commission Internationale de l'Éclairage, *Espace de couleurs CIE 1976 L\*u\*v\**, 2014. Disponible en ligne à l'adresse <https://cie.co.at/eilv/159>.
- [8] Moon, P. et Spencer, D. E., *The Visual Effect of Non-Uniform Surrounds*, J. Optical Soc. America, vol. 25, N° 3, p. 233-248, 1945.

### Annexe 3 (informative)

#### Informations contextuelles concernant la forme fonctionnelle du niveau d'image dans le temps

##### Introduction

La vision humaine s'adapte au fur et à mesure au contenu qui est vu. Cette adaptation dépend d'une certaine manière du contenu que l'observateur a vu dans un passé récent. On sait depuis longtemps que pour un stimulus présenté à une luminance fixe et pour une durée donnée, le niveau d'adaptation de l'observateur est lié au produit de la luminance présentée et de sa durée (c'est-à-dire, l'énergie totale à laquelle l'observateur a été exposé) [1] [2] [3]. Si, après une adaptation complète à un niveau de luminance fixe donné, le stimulus est supprimé, l'adaptation à l'obscurité s'ensuit, ce qui prend environ 30 minutes pour produire pleinement ses effets. La courbe d'adaptation à l'obscurité en fonction du temps est représentée à la Fig. 9.



BT.2163-09

*Note relative à la Fig. 9:* La zone ombrée représente 80% du groupe de participants. (Données de Hecht et Mandelbaum tirées de Pirenne M. H., *Dark Adaptation and Night Vision*, Chapitre 5, dans: Davson, H. (éd.), *The Eye*, vol 2. Londres, Academic Press, 1962.)

On peut voir que les bâtonnets et les cônes s'adaptent le long de courbes similaires, mais dans un scénario lumineux différent. Dans les fovéas, il n'existe que des cônes, de sorte que la partie de la

<sup>7</sup> Cette Figure est tirée de la page web suivante:  
<https://webvision.med.utah.edu/book/part-viii-gabac-receptors/light-and-dark-adaptation/>.

courbe déterminée par les bâtonnets serait absente. Comme indiqué plus haut, les courbes d'adaptation à l'obscurité dépendent de la luminance avant adaptation. De plus, la durée d'exposition à la luminance avant adaptation a un effet sur l'adaptation à l'obscurité. Des durées d'exposition plus courtes à la luminance avant adaptation se traduisent par une adaptation plus rapide. Cela suggère que l'exposition à la luminance dans un passé plus lointain entraîne un effet plus faible sur l'état actuel d'adaptation.

On peut supposer qu'il est possible de déterminer approximativement l'état actuel d'adaptation d'un observateur exposé à un contenu vidéo en intégrant de façon pondérée la luminance des trames vidéo antérieures, de sorte que les trames affichées dans un passé plus lointain aient un poids plus faible. L'équivalent en termes de traitement de l'image consisterait à intégrer l'emplacement de chaque pixel individuellement sur un certain nombre de trames précédentes. Toutefois, cette intégration équivaldrait à appliquer un filtre passe-bas temporel à l'emplacement de chaque pixel. Ainsi, en principe, il serait possible de déterminer l'état d'adaptation du système visuel d'un observateur exposé à une vidéo par convolution d'un filtre passe-bas avec la vidéo elle-même.

Une telle convolution nécessite de nombreux calculs et, en outre, l'effet peut être calculé d'une manière beaucoup plus efficace et plausible sur le plan biologique. À cette fin, la réponse des neurones dans le cerveau (humain) peut être correctement modélisée par des modèles (généralisés) d'intégration et de déclenchement (*integrate-and-fire*) à fuite. Les neurones présentent une relation entre les courants membranaires neuronaux à l'entrée et le voltage membranaire à la sortie<sup>8</sup>. On sait que les neurones laissent s'échapper un certain potentiel en fonction de leur résistance membranaire, de sorte qu'à l'instant  $t$  le courant de conduction  $I(t)$  est lié au voltage de la membrane  $V_m$ , comme suit:

$$I(t) = \frac{V_m(t)}{R_m} + C_m \frac{dV_m(t)}{dt}$$

où:

$R_m$ : résistance de la membrane

$C_m$ : capacité du neurone.

Il s'agit, en substance, d'un intégrateur à fuite<sup>9</sup>. Il est possible de multiplier par  $R_m$ , et d'introduire la constante de temps de la membrane  $\tau_m = C_m R_m$  pour obtenir<sup>10</sup>:

$$\tau_m \frac{dV_m(t)}{dt} = -V_m(t) + R_m I(t)$$

Il est raisonnable de supposer qu'au moment  $t = 0$ , le voltage de la membrane est à une certaine valeur constante, c'est-à-dire  $V_m(0) = V$ , et qu'à tout moment après, cette entrée disparaît, c'est-à-dire  $I(t) = 0$  lorsque  $t > 0$ . Cela équivaut à un neurone qui entame son adaptation à l'absence d'entrée. Pour un photorécepteur, par exemple, il s'agirait du moment où l'adaptation à l'obscurité commence, mais il est noté que ce processus n'est pas propre aux photorécepteurs. La solution en forme fermée de l'équation ci-dessus est alors la suivante:

$$V_m(t) = V e^{\frac{-t}{\tau_m}} \quad \text{pour } t > 0$$

On constate que cette équation modélise effectivement de manière qualitative les courbes d'adaptation à l'obscurité de la Fig. 9. En outre, il convient de noter que cette équation équivaut en principe au modèle proposé par Crawford en 1947 [4] [5]. L'intégration à fuite s'est avérée être un modèle approprié du comportement adaptatif des neurones intervenant dans la vision humaine.

<sup>8</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Biological\\_neuron\\_model#Leaky\\_integrate-and-fire](https://en.wikipedia.org/wiki/Biological_neuron_model#Leaky_integrate-and-fire).

<sup>9</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Leaky\\_integrator](https://en.wikipedia.org/wiki/Leaky_integrator).

<sup>10</sup> <https://neurondynamics.epfl.ch/online/Ch1.S3.html>.

Pour les valeurs de  $t$  proches de 0, la dérivée de la fonction ci-dessus tend vers  $\frac{-V}{\tau_m}$ , de sorte que le taux de variation initial peut être contrôlé au moyen du paramètre  $\tau_m$ . Pour parvenir à une formulation efficace du point de vue des calculs, on réécrit l'équation différentielle ci-dessus comme suit:

$$\tau_m(V_m(t) - V_m(t-1)) = -V_m(t) + R_m I(t)$$

de sorte que:

$$(\tau_m + 1)V_m(t) - \tau_m V_m(t-1) = R_m I(t)$$

ce qui donne lieu à:

$$V_m(t) = \frac{\tau_m}{\tau_m + 1} \left( V_m(t-1) + \frac{I(t)}{R_m} \right)$$

La structure de cette équation suggère que la sortie d'un neurone  $V_m$  à l'instant  $t$  est fonction de la sortie du neurone à l'instant  $t-1$ , ainsi que de l'entrée  $I$  à l'instant  $t$ .

Pour mettre en œuvre ce modèle en tant qu'intégrateur à fuite pouvant être appliqué à des images ou à des valeurs obtenues à partir d'images, la résistance membranaire  $R_m$  peut être fixée à 1, de sorte que:

$$V_m(t) = \frac{\tau_m}{\tau_m + 1} \left( V_m(t-1) + \frac{I(t)}{\tau_m} \right)$$

Pour appliquer ce modèle dans un contexte de radiodiffusion, il est préférable d'utiliser un niveau d'adaptation unique par trame plutôt qu'un niveau d'adaptation par pixel. Pour ce faire, il convient de noter que l'adaptation continue  $L_a(t)$  de la trame  $t$  peut être estimée par une certaine luminance moyenne d'une trame, par exemple le niveau d'image ( $IL$ ). L'état d'adaptation dans le temps  $L_T(t)$  s'obtient alors avec la formule suivante:

$$L_T(t) = \frac{\tau_m}{\tau_m + 1} \left( L_T(t-1) + \frac{L_a(t)}{\tau_m} \right)$$

L'application de cette méthode a l'effet d'un filtre passe-bas temporel, mais sans la complexité de calcul associée à de telles opérations de filtrage. Cette méthode est donc incluse comme mesure de l'adaptation du système visuel humain au contenu en mouvement.

L'équation ci-dessus peut être réordonnée comme suit:

$$L_T(t) = L_T(t-1) \left( 1 - \frac{1}{\tau_m + 1} \right) + L_a(t) \left( \frac{1}{\tau_m + 1} \right)$$

## Bibliographie

- [1] F. A. Mote et A. J. Riopelle, *The effect of varying the intensity and the duration of preexposure upon foveal dark adaptation in the human eye*, J. comp. physiol. Psychol., p. 46(1):49-55, 1953.
- [2] Ledda, Patrick, Luis Paulo Santos et Alan Chalmers, *A local model of eye adaptation for high dynamic range images*, dans les procès-verbaux de la 3ème Conférence internationale sur l'infographie, la réalité virtuelle, la visualisation et l'interaction en Afrique, p. 151-160. ACM, 2004.
- [3] F. A. Mote et A. J. Riopelle, *The effect of varying the intensity and the duration of preexposure upon foveal dark adaptation in the human eye*, The Journal of general physiology 34, N° 5 (1951): p. 657-674.
- [4] Crawford, B. H., *Visual adaptation in relation to brief conditioning stimuli*, Proc. R. Soc. Lond. B 134, N° 875 (1947): p. 283-302.

- [5] Pianta, Michael J., et Michael Kalloniatis, *Characterisation of dark adaptation in human cone pathways: an application of the equivalent background hypothesis*, *The Journal of physiology* 528, N° 3 (2000): p. 591-608.

## Annexe 4 (informative)

### Vérification de la constante de temps dans le niveau d'image dans le temps

#### Introduction

La présente Annexe décrit les travaux de recherche effectués pour déterminer la valeur  $\tau$  appropriée pour l'algorithme de temps de décroissance dont il est fait mention dans le § 2.

#### Essais subjectifs

Un ensemble d'essais subjectifs a été élaboré par Dolby Laboratories. La nouveauté de cette expérience réside dans l'étude de la tolérance subjective aux sauts de brillance dans le temps. Deux versions de l'expérience ont été réalisées pour estimer les réponses visuelles au passage clair-sombre-clair et au passage sombre-clair-sombre. Dans le premier cas, on a d'abord montré aux observateurs une image claire pendant 10 secondes, puis une image sombre pendant une durée variable, avant de revenir à l'image claire pendant 7 secondes. De manière analogue, dans le second cas, on a d'abord montré aux observateurs une image sombre pendant 10 secondes, puis une image claire pendant une durée variable, avant de revenir à l'image sombre pendant 7 secondes. Le Tableau 2 présente les différentes durées d'affichage de la deuxième image qui ont été appliquées dans les deux versions de l'expérience. Avant l'expérience, une série de tests bêta ont été effectués pour déterminer les durées optimales à appliquer pour chaque version de l'expérience.

TABLEAU 2  
Durée du parcours de temps d'adaptation mis en œuvre  
dans le cadre de l'expérience

Version de l'expérience	Durée d'affichage de la deuxième image (en secondes)
Clair-sombre-clair	0,5; 5; 10; 25; 40; 60; 90; 120; 150
Sombre-clair-sombre	0,5; 2; 5; 10; 15; 20; 30; 60

Après le passage de la deuxième image à la troisième image, on a demandé aux participants d'évaluer leur expérience. Le Tableau 3 présente les notes et la terminologie associées à l'échelle de dégradation. Les termes qui indiquent un degré de pénibilité ou de gêne ont chacun deux valeurs pour ajouter une gradation. De plus, les deux versions de l'expérience utilisent un langage différent pour rendre compte des sensations ressenties par l'observateur après la jonction de brillance.

TABLEAU 3

**Échelle de dégradation utilisée pour classer la jonction  
pour les deux versions de l'expérience**

Note(s)	Terminologie pour la version clair-sombre-clair	Terminologie pour la version sombre-claire-sombre
1; 1,5	Pénible	Gênant
2; 2,5	Particulièrement pénible	Particulièrement gênant
3; 3,5	Légèrement pénible	Légèrement gênant
4	Pas pénible	Pas gênant

Les participants à cette expérience subjective sont issus d'un groupe hétérogène composé de 17 observateurs experts et non experts. Des conditions d'observation conformes à la Recommandation UIT-R BT.2100 avec une luminance à 5 cd/m<sup>2</sup> ont été appliquées, avec un projecteur laser Christie 4K 6P. Le projecteur laser a été étalonné avec une luminance maximale paramétrée à 1 000 cd/m<sup>2</sup> et le niveau de noir mesuré était de 0,0004 cd/m<sup>2</sup>. Les images étaient placées de telle sorte qu'elles sous-tendaient un angle horizontal de 3,2 hauteurs d'image par rapport à la position de visualisation de l'observateur. Le signal d'image a été envoyé sur l'interface numérique normalisée (SDI) après avoir été codé au moyen de la fonction de transfert électro-optique PQ.

#### **Images utilisées pour les essais**

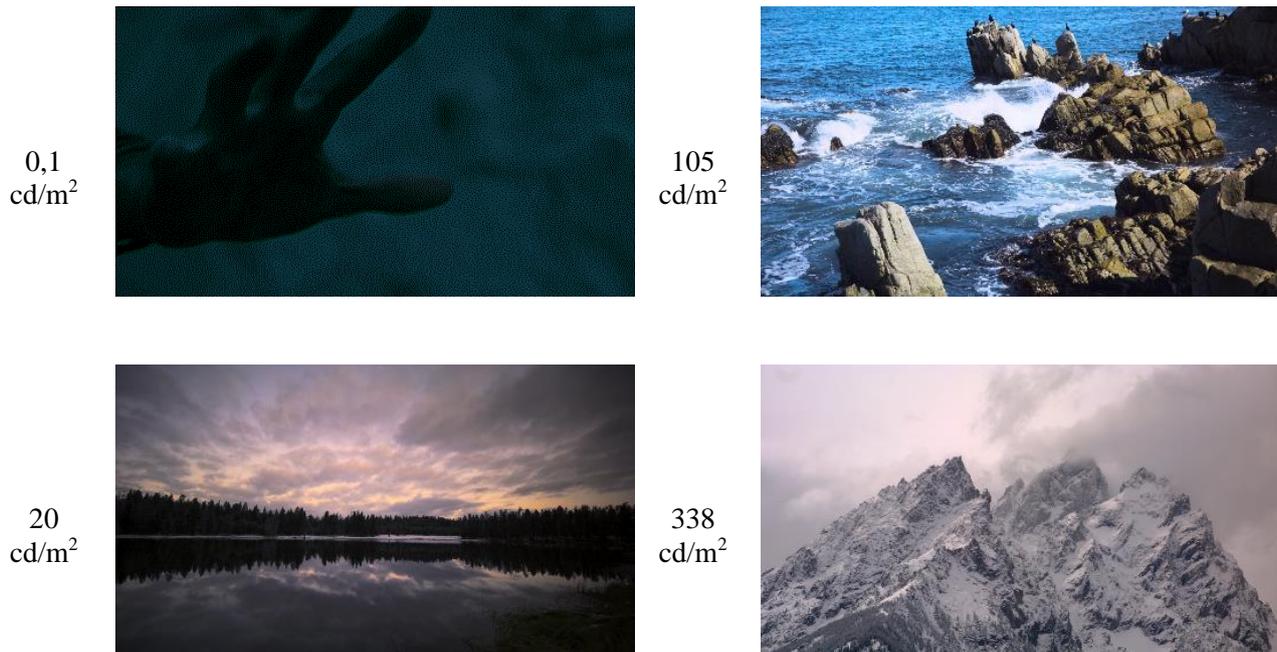
Au total, quatre images ont été utilisées dans cette étude (voir la Fig. 10). Une image a servi d'image «sombre» tandis que les trois autres images ont servi d'image «claire» de niveaux différents. La procédure d'essai a été répétée pour chaque image claire. Toutes les images ont été converties en tons pour être affichées dans la gamme de luminance du projecteur. L'image sombre a été créée par Dolby Laboratories, Inc. (Dolby) et les trois images claires ont été concédées sous licence à Dolby par Spears & Munsil<sup>11</sup>. Les images, ainsi que leurs valeurs moyennes calculées de luminance d'affichage, sont représentées à la Fig. 1. Les valeurs moyennes de luminance d'affichage ont été calculées à l'aide de l'algorithme de niveau d'image mentionné dans le § 1.

---

<sup>11</sup> Outil de référence Ultra HD de Spears & Munsil (2023).  
<https://www.biaslighting.com/products/spears-munsil-ultra-hd-benchmark-2023>.

FIGURE 10

Images utilisées pour les essais à des valeurs moyennes de luminance d'affichage spécifiées sur le projecteur de 1 000 cd/m<sup>2</sup>



### Résultats des essais

Dans les deux versions de l'expérience, trois images «claires» différentes ont été évaluées afin de tester le passage à différentes valeurs moyennes de luminance d'affichage. Cela a été fait pour montrer comment la note subjective moyenne (MSS) change avec l'amplitude du saut de brillance en plus de la façon dont elle change tout au long du temps d'adaptation.

La Figure 11 montre les notes moyennes et les intervalles de confiance à 95% pour les trois images sur les neuf essais portant sur le temps d'adaptation. Une note MSS de 4 représente une transition qui ne s'accompagne d'aucune douleur oculaire ou gêne subjective, tandis que des notes égales ou inférieures à 2 suggèrent une douleur ou une gêne oculaire notable.

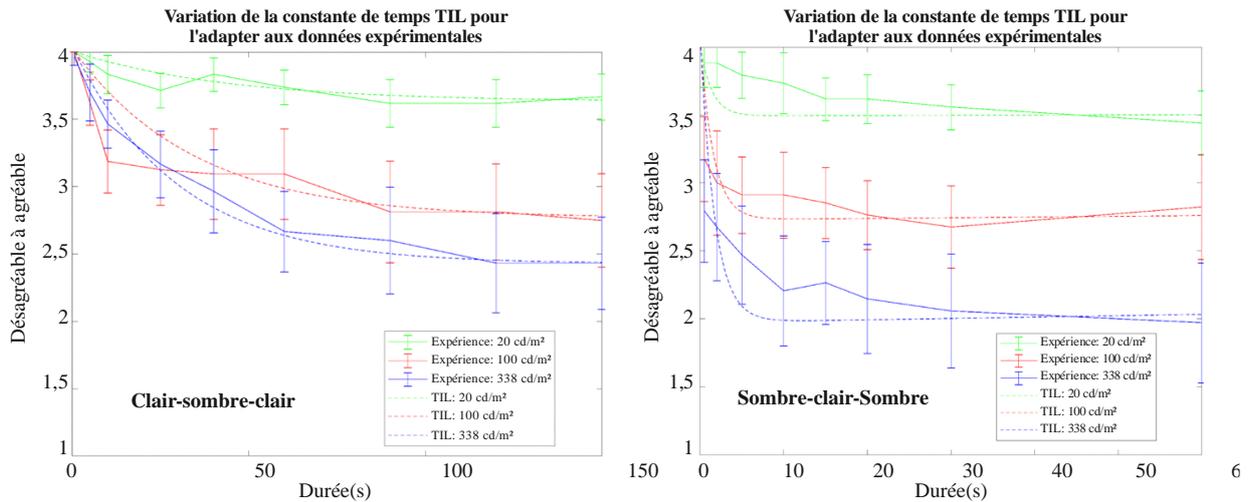
Pour ajuster une valeur  $\tau$  appropriée à l'équation TIL, il est nécessaire de rapporter le temps d'adaptation aux résultats MSS. La réponse ILR (voir le § 3) est une approximation plus proche de l'expérience subjective.

Par conséquent, après conversion de la luminance moyenne de l'écran en niveau d'image, on a appliqué les équations TIL avec différentes valeurs  $\tau$  pour estimer le niveau d'adaptation à l'image sombre après l'exposition initiale de dix secondes à l'image claire et les différents temps d'adaptation. Une fois que les estimations à partir des équations TIL ont été faites pour chaque combinaison d'image claire et de temps d'adaptation, les valeurs ILR ont été calculées. Les valeurs de réponse ont ensuite été mises à l'échelle de manière à refléter la gamme de notes MSS couverte par leurs valeurs de brillance respectives. On a, pour ce faire, utilisé via la procédure standard de normalisation et de mise à l'échelle des intervalles.

Ces valeurs MSS estimées au moyen des équations TIL, avec une valeur  $\tau$  optimale, sont représentées dans la Fig. 11 en pointillés à côté des données expérimentales représentées par des lignes pleines pour l'expérience.

FIGURE 11

Notes subjectives moyennes des transitions de brillance pour des temps d'adaptation différents par rapport aux notes subjectives moyennes générées approximativement



BT.2163-11

Les valeurs optimales de  $\tau$  pour cette forme fonctionnelle sont indiquées ci-dessous (dans les intervalles de confiance). Pour maintenir les temps d'adaptation à un faible niveau, on utilise pour le § 2 la limite inférieure des valeurs optimales.

$$\tau = \begin{cases} [22 \text{ to } 25] \frac{f}{24} & \text{si } p(t) \geq 0 \\ [800 \text{ to } 2\,000] \frac{f}{24} & \text{si } p(t) < 0 \end{cases}$$

Le temps de décroissance suit de plus près les tendances des données expérimentales pour la version de l'expérience correspondant au passage clair-sombre-clair. On observe un écart notable pour 100 cd/m<sup>2</sup> à 10 secondes. Il serait utile de mener des travaux dans l'avenir pour étudier cette valeur aberrante. La constante de temps de décroissance ne suit pas les données expérimentales pour le passage sombre-clair-sombre de manière aussi nette que pour la version du passage clair-sombre-clair. Cela tient en grande partie à l'influence accrue de l'amplitude de la jonction de la brillance sur de courtes durées. Les observateurs ont remarqué une image rémanente immédiate, même avec la durée la plus courte d'une image claire. La forme fonctionnelle actuelle ne permet pas une chute immédiate suivie d'une décroissance lente. Il serait utile de mener des travaux complémentaires pour étudier ce phénomène.