

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R BT.2124-0
(01/2019)

**Métrique objective pour l'évaluation de la
visibilité potentielle des différences de
couleur à la télévision**

Série BT
Service de radiodiffusion télévisuelle



Union
internationale des
télécommunications

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/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre 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: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

| Séries | Titre |
|------------|--|
| BO | Diffusion par satellite |
| BR | Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision |
| BS | Service de radiodiffusion sonore |
| BT | Service de radiodiffusion télévisuelle |
| F | Service fixe |
| M | Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés |
| P | Propagation des ondes radioélectriques |
| RA | Radio astronomie |
| RS | Systèmes de télédétection |
| S | Service fixe par satellite |
| SA | Applications spatiales et météorologie |
| SF | Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe |
| SM | Gestion du spectre |
| SNG | Reportage d'actualités par satellite |
| TF | Émissions de fréquences étalon et de signaux horaires |
| V | 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, 2020

© UIT 2020

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.2124-0*

**Métrique objective pour l'évaluation de la visibilité potentielle
des différences de couleur à la télévision**

(2019)

Domaine d'application

La présente Recommandation définit une métrique objective de différence de couleur à utiliser pour évaluer la visibilité potentielle de petites différences de couleur dans les images et signaux de télévision. Pour cela, on se place dans le cas de figure d'un état d'adaptation de l'observateur présentant une très grande sensibilité à la couleur évaluée. Les applications comprennent, entre autres, l'étalonnage de l'écran, la caractérisation de la caméra et de l'écran, et l'évaluation objective des différences introduites par les techniques de traitement du signal.

Mots clés

Étalonnage, métrique, mesure, couleur, HDR, TV-HDR, IC_{TCP}

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que la fidélité des couleurs est un paramètre important des systèmes et équipements de télévision;
- b) que les évaluations subjectives de la fidélité des couleurs sont complexes et prennent du temps;
- c) qu'une mesure, ou métrique, objective des petites différences de couleur correspondant à la perception subjective faciliterait l'évaluation des systèmes et équipements de télévision;
- d) que les métriques existantes de différence de couleur supposent un certain état d'adaptation de l'observateur (p. ex. blanc de référence, niveau d'éclairage, environnement d'observation, etc.);
- e) qu'avec la télévision, l'état d'adaptation de l'observateur est variable et souvent inconnu;
- f) qu'il est souhaitable de disposer d'une métrique qui indique la perceptibilité potentielle des différences de couleur,

recommande

qu'une métrique de différence de couleur, ΔE_{ITP} , à utiliser pour évaluer la visibilité potentielle des différences de couleur dans les images et signaux de télévision soit calculée comme décrit à l'Annexe 1.

* La Commission d'études 6 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à la présente Recommandation en février 2020 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 1.

Annexe 1 (normative)

Métrique objective de différence de couleur ΔE_{ITP}

1 Introduction

La métrique ΔE_{ITP} définie dans la présente Recommandation fournit une évaluation objective de la question de savoir si la différence entre deux couleurs peut être visible. Pour plus de commodité, on applique un facteur multiplicatif à ΔE_{ITP} de sorte qu'une valeur de 1 corresponde à une différence de couleur tout juste perceptible. Pour garantir que cette métrique ne sous-estimera pas les différences de couleur, on considère l'état d'adaptation présentant la plus grande sensibilité. Cela signifie que la métrique ΔE_{ITP} ne sous-estimera pas les différences de couleur perçues; mais il se peut qu'elle les surestime.

La métrique de différence de couleur ΔE_{ITP} est obtenue à partir des composantes IC_{TCP} basées sur un écran. Les composantes IC_{TCP} sont définies de manière normative dans le Tableau 7 de la Recommandation UIT-R BT.2100 et cette définition est reproduite dans la présente Recommandation pour plus de commodité. Pour d'autres représentations du signal, y compris XYZ, on se reportera à l'Annexe 2 (informative) pour la conversion au format RGB. Une autre métrique pour les signaux relatifs basés sur une scène est donnée à l'Annexe 3 (informative). On trouvera à l'Annexe 4 (informative) un exemple d'utilisation pour l'étalonnage et la caractérisation des écrans.

2 Calcul de ΔE_{ITP}

Étape 1: Convertir les composantes R, G, B linéaires basées sur un écran (conformément au Tableau 10 de la Recommandation UIT-R BT.2100) en composantes L, M, S linéaires (conformément au Tableau 7 de la Recommandation UIT-R BT.2100):

$$L = (1688R + 2146G + 262B)/4096$$

$$M = (683R + 2951G + 462B)/4096$$

$$S = (99R + 309G + 3688B)/4096$$

Étape 2: Convertir les composantes L, M, S linéaires en composantes L', M', S' non linéaires en appliquant la non-linéarité PQ définie dans le Tableau 4 de la Recommandation UIT-R BT.2100:

$$\{L', M', S'\} = EOTF^{-1}(F)$$

où:

$$F = \{L, M, S\}$$

$$EOTF^{-1}(F) = \left(\frac{c_1 + c_2 Y^{m_1}}{1 + c_3 Y^{m_1}} \right)^{m_2}$$

$$Y = F/10000$$

$$m_1 = 2610/16384 = 0,1593017578125$$

$$m_2 = 2523/4096 \times 128 = 78,84375$$

$$c_1 = 3424/4096 = 0,8359375 = c_3 - c_2 + 1$$

$$c_2 = 2413/4096 \times 32 = 18,8515625$$

$$c_3 = 2392/4096 \times 32 = 18,6875.$$

Étape 3: Convertir les composantes L' , M' , S' non linéaires en composantes I , C_T , C_P comme défini dans le Tableau 7 de la Recommandation UIT-R BT.2100:

$$I = 0,5L' + 0,5M'$$

$$C_T = (6610L' - 13613M' + 7003S')/4096$$

$$C_P = (17933L' - 17390M' - 5435S')/4096$$

Étape 4: Appliquer un facteur multiplicatif à $I C_T C_P$ pour obtenir ITP:

$$I = I$$

$$T = 0,5 \times C_T$$

$$P = C_P$$

Étape 5: Calculer ΔE_{ITP} :

$$\Delta E_{ITP} = 720 \times \sqrt{(I_1 - I_2)^2 + (T_1 - T_2)^2 + (P_1 - P_2)^2}$$

où les composantes I , T et P , auxquelles un facteur multiplicatif a été appliqué, correspondent à une version des composantes de couleur d'un signal de télévision exprimée dans le système PQ défini dans le Tableau 7 de la Recommandation UIT-R BT.2100; les indices 1 et 2 désignent les deux signaux à comparer; une valeur de 1 équivaut à une différence juste perceptible lorsque l'observation a lieu dans l'état d'adaptation présentant la plus grande sensibilité.

Annexe 2 (informative)

Conversion au format RGB linéaire basé sur un écran conformément aux spécifications figurant dans la Recommandation UIT-R BT.2100

La présente Annexe (informative) décrit la conversion depuis plusieurs représentations de couleurs couramment utilisées vers le format RGB linéaire basé sur un écran que l'on utilise pour calculer la différence de couleur ΔE_{ITP} .

Conversion 1: Format X, Y, Z CIE 1931 vers format R, G, B linéaire basé sur un écran

Les valeurs XYZ linéaires sont souvent communiquées lorsqu'il s'agit d'effectuer des mesures sur des écrans physiques à l'aide d'un colorimètre imageur. On peut convertir ces valeurs au format RGB basé sur un écran en suivant les étapes de conversion ci-dessous. Le résultat peut ensuite être utilisé comme donnée d'entrée à l'étape 1 de l'Annexe 1. On notera que cette opération peut être combinée avec l'opération de conversion au format L, M, S linéaire de l'étape 1 de l'Annexe 1 pour un calcul efficace.

$$R = 1,716651187971268X - 0,355670783776392Y - 0,253366281373660Z$$

$$G = -0,666684351832489X + 1,616481236634939Y + 0,015768545813911Z$$

$$B = 0,017639857445311X - 0,042770613257809Y + 0,942103121235474Z$$

Conversion 2: Représentation numérique des couleurs IC_{TCP}

On peut utiliser la représentation des couleurs IC_{TCP} pour calculer ΔE_{ITP} après avoir annulé l'application du facteur multiplicatif pour la plage numérique, puis passer directement à l'étape 4 de l'Annexe 1. La conversion dépend de la profondeur binaire et de la représentation numérique à plage étroite ou complète, comme indiqué dans le Tableau 9 de la Recommandation UIT-R BT.2100.

Plage complète

$$I = I_D / (2^n - 1)$$

$$C_T = (C_{TD} - 2^{n-1}) / (2^n - 1)$$

$$C_P = (C_{PD} - 2^{n-1}) / (2^n - 1)$$

Plage étroite

$$I = ((I_D / 2^{n-8}) - 16) / 219$$

$$C_T = ((C_{TD} / 2^{n-8}) - 128) / 224$$

$$C_P = ((C_{PD} / 2^{n-8}) - 128) / 224$$

où:

n est la profondeur binaire

$\{I_D, C_{TD}, C_{PD}\}$ sont les représentations numériques de la représentation des couleurs IC_{TCP}.

Conversion 3: Représentation numérique des couleurs RGB PQ BT.2100 vers format R, G, B linéaire basé sur un écran

On peut convertir la représentation numérique des couleurs RGB PQ au format RGB linéaire basé sur un écran en suivant les étapes de conversion ci-dessous. La conversion dépend de la profondeur binaire et la représentation numérique à plage étroite ou complète. Le résultat peut ensuite être utilisé comme donnée d'entrée à l'étape 1 de l'Annexe 1. Cette conversion suit le processus décrit dans le Tableau 4 de la Recommandation UIT-R BT.2100.

$$E' = \begin{cases} E'_D / (2^n - 1) & \text{plage complète} \\ ((E'_D / 2^{n-8}) - 16) / 219 & \text{plage étroite} \end{cases}$$

où n est la profondeur binaire.

$$\{R, G, B\} = EOTF(E')$$

où:

$E' = \{R', G', B'\}$ signaux non linéaires normalisés.

$$EOTF(E') = 10\,000 * \left(\frac{\max[E'^{1/m_2} - c_1, 0]}{c_2 - c_3 E'^{1/m_2}} \right)^{1/m_1}$$

$$m_1 = 2610/16384 = 0,1593017578125$$

$$m_2 = 2523/4096 \times 128 = 78,84375$$

$$c_1 = 3424/4096 = 0,8359375 = c_3 - c_2 + 1$$

$$c_2 = 2413/4096 \times 32 = 18,8515625$$

$$c_3 = 2392/4096 \times 32 = 18,6875$$

Conversion 4: Représentation numérique des couleurs RGB HLG BT.2100 vers format R, G, B linéaire basé sur un écran

On peut convertir la représentation numérique des couleurs RGB HLG au format RGB basé sur un écran en suivant les étapes de conversion ci-dessous. La conversion dépend de la profondeur binaire et de la représentation numérique à plage étroite ou complète. Pour la conversion, on considère un écran ayant une luminance de crête de 1 000 cd/m² avec un gain d'utilisateur de 1,0 et un décalage du niveau de noir par l'utilisateur de 0,0. Le résultat peut ensuite être utilisé comme donnée d'entrée à l'étape 1 de l'Annexe 1. Cette conversion suit le processus décrit dans le Tableau 5 de la Recommandation UIT-R BT.2100.

$$E' = \begin{cases} E'_D / (2^n - 1) & \text{plage complète} \\ ((E'_D / 2^{n-8}) - 16) / 219 & \text{plage étroite} \end{cases}$$

où n est la profondeur binaire.

$$\{R, G, B\} = EOTF(E')$$

où:

$$E' = \{R', G', B'\} \quad \text{signaux non linéaires normalisés.}$$

$$EOTF(E') = OOTF(OETF^{-1}(E'))$$

$$OETF^{-1}(x) = \begin{cases} x^2 / 3 & 0 \leq x \leq 1/2 \\ \{\exp((x - c)/a) + b\} / 12 & 1/2 < x \leq 1 \end{cases}$$

$$OOTF(x) = L_W \cdot Y_S^{\gamma-1} x$$

$$Y_S = 0,2627R_S + 0,6780G_S + 0,0593B_S$$

$$\{R_S, G_S, B_S\} = OETF^{-1}(E')$$

$$L_W = 1\,000 \text{ cd/m}^2$$

$$\gamma = 1,2$$

$$a = 0,17883277$$

$$b = 1 - 4a$$

$$c = 0,5 - a(\ln(4a))$$

Conversion 5: Représentation numérique des couleurs RGB BT.1886 vers format R, G, B linéaire basé sur un écran

On peut convertir la représentation numérique des couleurs RGB BT.709 au format RGB linéaire BT.2100 basé sur un écran en suivant les étapes de conversion ci-dessous. La conversion dépend de la profondeur binaire. En règle générale, on utiliserait une valeur de $L_W = 100 \text{ cd/m}^2$ (conformément à la Recommandation UIT-R BT.2035), avec un niveau du noir «b» de 0,0. Le résultat peut ensuite être utilisé comme donnée d'entrée à l'étape 1 de l'Annexe 1. Cette conversion emploie la fonction EOTF spécifiée à l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R BT.1886.

$$E' = ((E'_D / 2^{n-8}) - 16) / 219 \quad \text{plage étroite}$$

où n est la profondeur binaire.

$$\{R_{709}, G_{709}, B_{709}\} = EOTF(E')$$

$$R_{2100} = 0,6274R_{709} + 0,3293G_{709} + 0,0433B_{709}$$

$$G_{2100} = 0,0691R_{709} + 0,9195G_{709} + 0,0114B_{709}$$

$$B_{2100} = 0,0164R_{709} + 0,0880G_{709} + 0,8956B_{709}$$

où:

$E' = \{R', G', B'\}$ signaux non linéaires normalisés.

$$EOTF(E') = L_W \times E'^{2.4}$$

Annexe 3 (informative)

Fidélité relative des couleurs avec HLG et métrique ΔITP_R

La métrique ΔE_{ITP} définie et décrite à l'Annexe 1 donne une indication de la différence de perception entre deux signaux s'ils étaient affichés sur un écran parfait. La métrique ne peut pas être appliquée directement aux signaux relatifs basés sur une scène pour lesquels n'est pas définie explicitement une luminance de crête à laquelle le signal devrait être affiché. Pour les signaux basés sur une scène, la métrique ΔE_{ITP} ne peut être appliquée que lorsqu'on considère une valeur nominale de la luminance de crête de l'écran. Pour d'autres luminances de crête de l'écran, la métrique ne fournit qu'une mesure ordinaire de la distorsion.

Dans certaines applications, par exemple l'évaluation de l'espacement de quantification pour le codage au format HLG, il peut être plus simple de calculer une autre métrique fondée sur les composantes IC_{TC_P} HLG relatives, comme défini dans le Tableau 7 de la Recommandation UIT-R BT.2100. En raison de la différence en termes de facteur multiplicatif par rapport aux composantes IC_{TC_P} PQ, T et P pour la métrique relative sont calculés comme suit :

$$I = I$$

$$T = 0,5 \times 1,823698 \times C_T$$

$$P = 1,887755 \times C_P$$

Cette métrique relative fournit une mesure ordinaire de la différence de perception de signaux basés sur une scène. La distance euclidienne dans cet espace ITP représente l'amplitude de la différence de couleur, et est désignée par ΔITP_R .

Cette métrique ΔITP_R se rapproche davantage de la métrique PSNR utilisée pour déterminer l'espacement de quantification pour le codage vidéo. Cependant, elle présente le double avantage de fournir une meilleure corrélation avec les différences de perception et de tenir compte simultanément de la couleur et de la luminance.

Annexe 4 (informative)

Application de ΔE_{ITP} pour évaluer la fidélité des couleurs

1 Évaluation de la précision des couleurs à l'écran

Pour la caractérisation d'un écran, on utilise généralement comme instrument de mesure un colorimètre, qui fournit des mesures de chromaticité XYZ ou xyY. Dans cet exemple, on considère des mesures XYZ.

Pour obtenir la précision de reproduction de la mire de référence de barres de couleur de la Rec. UIT-R BT.2111 sur un écran, on peut commencer par effectuer des mesures au coin inférieur droit de la mire (bleu BT.709 PQ 58%). La valeur attendue peut être calculée comme suit:

- 1 Prendre les valeurs de code à plage complète sur 10 bits qui correspondent à la zone en bleu (elles figurent dans la Recommandation UIT-R BT.2111): [296, 201, 582].
- 2 Normaliser les valeurs de code en les divisant par 1023: [0,2893, 0,1964, 0,5689].
- 3 Convertir au format RGB linéaire en utilisant la fonction EOTF PQ: [8,753, 2,291, 181,3].
- 4 Convertir au format ITP comme décrit dans l'Annexe 1. Les valeurs ITP pour le bleu BT.709 PQ 58% sont alors: [0,3554, 0,1346, -0,1613].

2 Calcul de la différence de couleur

Supposons que le colorimètre renvoie les valeurs [36, 15, 190] pour les composantes trichromatiques XYZ, les valeurs XYZ peuvent être converties au format ITP en appliquant la conversion depuis XYZ vers RGB donnée dans l'Annexe 2, puis en suivant les étapes de l'Annexe 1. On obtient alors les valeurs [0,3568, 0,1321, -0,1629].

La différence de couleur peut être calculée au moyen de l'équation donnant ΔE_{ITP} :

$$\Delta E_{ITP} = 720 \times \sqrt{(0,3554 - 0,3568)^2 + (0,1346 - 0,1321)^2 + ((-0,1613) - (-0,1629))^2}$$

$$\Delta E_{ITP} = 2,363$$

Pour l'étalonnage de l'écran, deux chiffres significatifs donnent souvent une précision suffisante, de sorte que le résultat peut être arrondi à 2,4. Cette valeur de 2,4 correspond à la différence visible entre ce qui était attendu et ce qui est produit à l'écran dans un état d'adaptation présentant une très grande sensibilité. En pratique, une tolérance inférieure à 3 peut constituer un niveau de précision acceptable pour un écran de référence. Toutefois, la tolérance appropriée peut varier considérablement d'une application à l'autre.

Certains écrans peuvent produire des couleurs en dehors de la gamme de couleurs de la Recommandation UIT-R BT.2100. Dans ce cas, la conversion depuis XYZ vers RGB peut donner des nombres négatifs. ITP permet aussi de représenter ces couleurs. Ainsi, si l'on souhaite mesurer la fidélité de ces couleurs en dehors de la gamme de couleurs, les nombres négatifs devraient être ignorés tout au long de la conversion au format ITP.

3 Évaluation de l'effet du traitement du signal sur la précision des couleurs

Supposons qu'un signal basé sur un écran soit traité et que de petites erreurs de couleur soient introduites, et que l'on souhaite quantifier l'effet subjectif de ces erreurs de couleur. Les valeurs des pixels d'entrée et de sortie seraient converties dans le domaine ITP en utilisant la non-linéarité PQ, et ΔE_{ITP} serait alors calculé pour déterminer l'amplitude de l'erreur de couleur subjective. Une valeur de $\Delta E_{ITP} > 1$ indique que l'erreur de couleur peut être perceptible.

Étant donné que ITP peut représenter des couleurs n'entrant pas dans le cadre de la Recommandation UIT-R BT.2100, il peut être souhaitable de limiter le signal ITP à la gamme de couleurs de la Recommandation UIT-R BT.2100, afin de garantir que les valeurs de ΔE_{ITP} sont représentatives du signal affiché sur un écran de référence conforme à la Recommandation UIT-R BT.2100. Pour limiter le signal, les valeurs ITP seraient d'abord converties au format RGB, les valeurs négatives seraient mises à zéro, puis on procéderait à une conversion pour revenir au format ITP.
