

RECOMMANDATION UIT-R BT.813*

**Méthodes d'évaluation objective de la qualité de l'image
en fonction des dégradations qui résultent du codage
numérique des signaux de télévision**

(Question UIT-R 44/6)

(1992)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que, avec la généralisation du codage numérique et de la transmission à débit binaire réduit, l'évaluation des dégradations dues au codage revêt une importance cruciale;
- b) que l'on a besoin de procéder à des mesures objectives pour des évaluations spécifiques comme les contrôles de routine et l'optimisation des systèmes;
- c) que l'on peut définir plusieurs types de mesures objectives pour les divers systèmes et applications numériques;
- d) que l'adoption de méthodes normalisées est essentielle pour l'échange d'informations entre divers laboratoires,

recommande

- 1 que l'on utilise, pour obtenir des mesures objectives de la qualité de l'image numérique, les méthodes générales décrites dans l'Annexe 1;
- 2 que l'on choisisse les mesures objectives appropriées à un système ou à une application en fonction des informations données dans l'Annexe 1.

ANNEXE 1

1 Introduction

L'évaluation des dégradations dues au codage est devenue d'une importance cruciale avec l'utilisation accrue du codage numérique et de la transmission à débit binaire réduit. La compréhension des méthodes d'évaluation est importante non seulement pour étudier la qualité de codage des nouveaux équipements, mais aussi pour interpréter les résultats des mesures faites sur des appareils de ce genre, ainsi que les définitions des objectifs de qualité. De plus, les codecs numériques et toutes les opérations numériques adaptatives ou non linéaires ne peuvent pas être pleinement caractérisés au moyen des signaux d'essai et des mires traditionnels de la télévision.

La qualité des codecs qui servent à la distribution peut se mesurer objectivement, les spécifications de la qualité s'expriment en fonction des appréciations subjectives d'observateurs.

* La Commission d'études 6 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2002 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-44.

Les études indiquent qu'il est souhaitable d'établir des relations entre les mesures objectives sur les signaux dégradés par le codage numérique et la qualité visuelle de l'image ainsi obtenue. La présente Annexe rend compte des progrès accomplis dans ce sens, mais le but est de plus en plus difficile à atteindre avec l'accroissement de complexité des codecs.

En théorie, la qualité d'un codec prévue pour des applications de contribution pourrait donc être définie en termes de caractéristiques objectives ou subjectives car le signal qu'il produit n'est pas destiné au visionnage immédiat, mais à la postproduction, à l'enregistrement et/ou au codage pour transmission ultérieure. Du fait de la difficulté de définir la qualité pour une série d'opérations de postproduction différentes, le principe choisi a consisté à définir les performances d'une chaîne d'appareils, y compris pour la fonction de postproduction, considérée comme représentative d'une application de contribution réelle. Cette chaîne pourrait être constituée d'un codec, suivi par un dispositif de postproduction (ou par un autre codec dans le cas de l'évaluation de la qualité intrinsèque de la contribution), puis par un autre codec avant présentation du signal à l'observateur. L'adoption de cette stratégie pour les codecs destinés aux applications de contribution a pour conséquence que les procédures de mesure décrites dans la présente Annexe peuvent aussi être utilisées pour les évaluer.

2 Classification des codes numériques

La fonction du codage numérique est de réduire le débit binaire nécessaire pour représenter une séquence d'images tout en garantissant une perte de qualité d'image minimale. Le matériel numérique y parvient en éliminant de l'image le plus possible d'éléments statistiquement redondants (cette première étape théorique n'introduit donc aucune perte de qualité). Si l'on doit réduire davantage le débit binaire, il faut introduire une certaine distorsion dans l'image, mais l'un des objectifs dans la conception d'un codec est de masquer cette distorsion en exploitant certaines insensibilités de perception du système visuel humain.

Il est commode de répartir les codecs entre deux classes regroupant ceux utilisant un codage à longueur de mot fixe et ceux où cette longueur est variable (on trouvera respectivement les définitions de ces termes aux § 3.1 et 3.2). La seconde classe a un meilleur rendement et est plus complexe; elle comprend tous les systèmes récemment proposés pour le codage de la vidéo 4:2:2 entre 30 et 45 Mbit/s. La première classe est cependant suffisante pour réduire la vidéo 4:2:2 à 140 Mbit/s, tout en conservant la qualité exigée pour les applications de contribution. Il est aussi utile de subdiviser encore ces classes en considérant les codecs intratrame (ou spatiaux) et ceux interimages (ou intertrames) comportant des mémoires d'image (ou de trame) leur permettant d'exploiter la redondance qui existe entre images (ou trames) consécutives.

Il commence à apparaître une troisième classe de codecs utilisant un codage à mots de longueur variable, mais conçus pour des réseaux à débit binaire variable. Ces codecs peuvent en principe conserver à l'image décodée une qualité constante jusqu'au maximum de charge du réseau. Les essais de qualité de tels codecs devraient tenir compte de la nature du réseau utilisé, ainsi que des statistiques des données injectées par tous ses usagers et ils restent à étudier.

3 Evaluation objective des codecs en termes de dégradation perçue de la qualité d'image

3.1 Codecs à mots de longueur fixe

Dans les codecs à mots de longueur fixe, on utilise un nombre invariable de bits pour représenter un nombre donné d'échantillons de l'image initiale. Par exemple, dans les codecs MIC ou MICD, à mots de longueur fixe, un nombre invariable de bits est affecté à la représentation de chaque

échantillon de l'image et dans ceux du type à transformation ou à quantification vectorielle à mots de longueur fixe, un nombre invariable de bits est attribué à chaque bloc d'échantillons de l'image.

3.1.1 Méthodes basées sur l'utilisation de signaux d'essai artificiels

Dans ces codecs, la dégradation introduite dans chacun des échantillons d'image reçus dépend de la valeur de ses voisins, soit dans la même trame (codecs intratrame), soit dans la même trame et dans la précédente (codecs intertrames). Il est donc possible de provoquer artificiellement au moyen de signaux d'essai numériques bi ou tridimensionnels les dégradations caractéristiques du codage numérique appliqué à l'image.

Certains des facteurs de dégradation ont reçu des noms, comme les faux contours, le bruit granulaire, le flou, les effets de blocs, etc., qui correspondent à la manière dont ils sont perçus par les observateurs. Après avoir provoqué ces distorsions, on peut mesurer objectivement leur amplitude et en mettant à profit l'expérience acquise au cours des évaluations subjectives, les résultats peuvent être mis en relation assez quantitative avec la qualité du codec. Il peut être difficile d'établir une relation entre les facteurs de dégradation et leur interprétation par les observateurs dans les systèmes de codage intertrames ou dans ceux utilisant un traitement adaptatif car cette relation peut varier à tout moment en fonction des mouvements ou de l'adaptation de l'algorithme de codage. Une méthode qui constitue une solution possible à ce problème utilise d'abord pour les essais subjectifs des échelles établies à partir d'adjectifs de sens opposé (technique de la différence sémantique), puis les résultats sont analysés par analyse de la composante principale pour en extraire les facteurs de dégradation de la qualité d'image. Les résultats du classement peuvent être testés en appliquant une analyse de régression multiple qui met en relation les facteurs de dégradation et les jugements subjectifs. Le Tableau 1 présente une liste de facteurs de dégradation de la qualité d'image.

TABLEAU 1

Exemple de facteurs de dégradation de la qualité dans les systèmes numériques et mesures physiques correspondantes (unités)

Facteur de dégradation de la qualité d'image	Mesure physique
Flou	Temps de montée de la réponse impulsionnelle
Flottement de contours	Gigue dans la réponse impulsionnelle
Faux contours	S_{c-c} au minimum $c-c$ d'erreur de quantification
Bruit granulaire	Equivalent au rapport S/N analogique exprimé en termes de S_{c-c} / N_{eff}
Effet de vitre sale	Amplitude maximale du bruit
Flou dû au mouvement	Temps de montée d'une transition mobile
Instabilité	Différence de position des transitions mobiles entre images ou trames

Ces méthodes semblent convenir pour l'évaluation des codecs et constituer aussi des outils de conception d'un codec, mais elles sont difficiles à mettre en relation avec les performances de l'appareil en face d'images réelles, et ceci pour les raisons suivantes:

- la composition complexe d'une séquence d'images réelles ne peut pas être représentée de manière satisfaisante par un nombre raisonnable de signaux d'essai artificiels;

- les dégradations peuvent être de nombreux types et être difficiles à classer du fait de leur nature subtile (par exemple, une distorsion donnée peut n'être visible que dans les parties texturées d'une image en mouvement d'une façon particulière);
- il risque d'être difficile de définir des mesures objectives significatives des dégradations (par exemple, pour le rendu du mouvement). Signalons que la durée de ces mesures devrait correspondre à la fenêtre d'observation dont on dispose pendant la présentation des essais subjectifs.

3.1.2 Méthodes basées sur des images naturelles et des erreurs de codage

On peut considérer les séquences d'images naturelles comme composées d'un certain nombre de régions différentes du point de vue de leur nature et de l'influence qu'elles exercent sur les codecs à mots de longueur fixe. La nature de la séquence aura donc un effet significatif sur la qualité perçue par l'observateur.

Il est aussi possible, en cas de comparaison entre deux codecs, que ce soit la séquence en question qui détermine quel est celui des codecs paraissant être le meilleur. Ces faits mettent en lumière l'importance du choix des images employées dans les évaluations subjectives (voir la Recommandation UIT-R BT.500), mais ils démontrent aussi que la mesure objective d'un codec donné doit prendre en compte la nature de l'image si l'on veut établir une relation entre les résultats de cette mesure et ceux de l'évaluation subjective.

Les formes les plus courantes de mesure objective de la qualité sont basées sur les erreurs de codage d'un codec, c'est-à-dire sur la différence entre la séquence d'images appliquée à son entrée et celle obtenue en sortie après décodage. Ce signal de différence (souvent d'amplitude) peut lui-même être visualisé et il constitue une aide utile pour les spécialistes de la conception des codecs. Il ne doit cependant pas être utilisé dans les essais subjectifs.

3.1.3 Méthodes basées sur l'erreur quadratique moyenne normalisée

L'erreur quadratique moyenne de codage est fréquemment utilisée dans la mesure objective de la qualité des images décodées. Il s'agit de la moyenne sur l'ensemble des échantillons d'une séquence d'images des carrés de l'erreur de codage sur les échantillons; sa valeur est généralement normalisée par rapport au carré de la largeur de la dynamique des échantillons d'image. On donne quelquefois l'erreur quadratique moyenne normalisée (EQMN) comme facteur de bruit de codage, sous la forme $-10 \log(\text{EQMN})$. La popularité de la méthode EQMN tient à sa simplicité mathématique, mais le résultat ne doit être considéré qu'avec prudence comme une mesure de la qualité après décodage. Par exemple, elle est incapable de faire la distinction entre un petit nombre d'importantes erreurs de codage (gênantes pour l'observateur) et un grand nombre d'erreurs de faible amplitude susceptibles de ne pas être perçues. On a tenté de pondérer le signal d'erreur de codage par une opération logarithmique avant l'évaluation de EQMN, grâce à un filtre représentant un modèle de la vision et on a ainsi obtenu une meilleure corrélation avec le résultat des évaluations subjectives. La EQMN est un bon outil pour la mise au point des codecs où l'on doit souvent comparer des méthodes de codage très semblables, c'est-à-dire utilisant des variantes mineures d'un même algorithme et où l'on peut admettre que le traitement des erreurs est identique.

3.1.4 Méthodes basées sur des modèles de la vision

La sensibilité du système visuel humain aux erreurs de codage dans une région donnée de l'image est fortement influencée par les caractéristiques de l'image elle-même dans cette région. Son incapacité à tenir compte de ce fait est un des principaux points faibles de la méthode EQMN. On peut donner l'exemple suivant de cette influence: on sait que la sensibilité d'un observateur au bruit dû à une erreur de codage est réduite quand le spectre de ce bruit coïncide approximativement avec

celui de l'image «support». Ces propriétés du système visuel sont celles qui sont exploitées dans les codecs où l'on utilise des expériences subjectives ou des données psychovisuelles pour optimiser les paramètres du système.

Pour améliorer la correspondance entre les mesures objectives de la qualité d'image et les jugements portés par les observateurs humains, il faut créer un modèle de la vision capable d'interpréter les erreurs de codage locales en tenant compte de l'image support et de combiner toutes ces évaluations locales pour parvenir à une note de qualité globale. Ce principe est applicable aux codecs à mots de longueur fixe ou variable et il est examiné au § 3.2.3.

3.2 Codecs à mots de longueur variable

Dans les codecs de télévision où le débit binaire de l'image de source doit être divisé par un facteur dépassant deux, environ, on emploie des méthodes basées sur le codage à mots de longueur variable. Ces codecs ont un meilleur rendement car ils possèdent une souplesse leur permettant d'affecter dynamiquement les bits de codage aux parties de l'image où ils permettent le mieux de maintenir la qualité de l'image décodée. Il existe plusieurs manières d'y parvenir, sans nécessairement employer un codage à entropie de longueur variable.

3.2.1 Méthodes basées sur l'utilisation de signaux artificiels

Du fait de la souplesse de ces codecs, les dégradations qu'ils peuvent causer à un échantillon codé dépendent non seulement de la valeur des échantillons voisins, mais aussi de l'évolution dans le temps de ces échantillons, jusqu'à une image antérieure ou plus. Il en résulte que pour les codecs intratrames ou intertrames à mots de longueur variable, si l'on essayait de définir leurs caractéristiques en tentant de provoquer des distorsions locales au moyen de signaux d'essai également locaux et en mesurant ceux-ci le résultat n'aurait pas de sens. Toutefois, si l'on peut maintenir artificiellement les modes d'adaptation d'un codec à mots de longueur variable (ce qui signifie qu'on doit pouvoir accéder à ses mécanismes internes), chaque mode peut être caractérisé séparément. On peut alors se servir des informations sur la commutation des modes d'adaptation du codec, lorsque celui-ci est utilisé avec des scènes naturelles, afin de déterminer objectivement sa qualité de fonctionnement.

Il est possible d'imaginer des séquences d'essai artificielles en mouvement capables d'amener le codec au point où il provoque une distorsion visible, mais même si l'on pouvait définir des mesures objectives caractérisant ces distorsions (compte tenu des réserves exprimées au § 3.1.1), leur interprétation ne pourrait se faire que dans le cadre de la séquence de mesure complète. On est amené à se demander dans quelle mesure cela est représentatif des scènes naturelles et si le responsable de la conception d'un codec aurait la possibilité d'optimiser les caractéristiques de l'appareil pour les adapter à celles d'images d'essai connues.

3.2.2 Méthodes basées sur des images naturelles et des erreurs de codage

Il est important d'utiliser des séquences d'images naturelles dans toute évaluation d'un codec à mots de longueur variable. Si l'on tient compte de la faculté qu'ils ont de répartir l'utilisation des bits de codage sur toute l'image, on doit considérer de près la nature de chacune des parties de la séquence pour évaluer son caractère plus ou moins critique (voir la Recommandation UIT-R BT.500). Il est recommandé que toutes les mesures objectives soient basées sur les erreurs de codage données par un codec recevant à son entrée une série d'images naturelles. La méthode de l'erreur quadratique moyenne examinée au § 3.1.3 peut aussi être utilisée pour les erreurs de codage dans les codecs à mots de longueur variable, mais l'interprétation des résultats est réservée aux spécialistes et même ainsi, seulement en complément d'évaluations subjectives. De même, la comparaison objective entre codecs au moyen de la technique EQMN ne doit être faite que par des experts en conception de

codecs et uniquement lorsque les techniques à comparer sont très peu différentes (c'est-à-dire constituent des variantes d'un même algorithme) et que l'on peut admettre l'identité des processus de dégradation.

3.2.3 Méthodes basées sur des modèles de la vision

Le principal inconvénient des mesures basées sur la méthode EQMN est qu'elle ne reconnaît pas la forte influence que la nature de l'image exerce sur la perception des dégradations par l'observateur. Comme signalé au § 3.1.4, l'optimisation d'un principe de codec nécessite de recourir à des expériences subjectives et à des données psychovisuelles pour l'adapter à la tolérance aux distorsions de l'observateur humain et aux caractéristiques locales des régions de l'image. De cette manière, lorsqu'un codec à mots de longueur variable répartit dans toute l'image la capacité binaire de codage (et, partant, l'importance des erreurs de codage), cette opération est également adaptée aux caractéristiques visuelles. Toute méthode de mesure objective doit donc tenir compte des propriétés du système visuel humain si l'on veut qu'elle donne des résultats en bonne corrélation avec les notes d'évaluation subjective. Le modèle de la vision a pour fonction d'interpréter les erreurs de codage en tenant compte de l'image initiale dans laquelle elles se produisent.

Dans le texte ci-après, on part du principe qu'on ne peut avoir accès aux mécanismes internes des codecs. Si l'on peut obtenir des renseignements sur les modes d'adaptation, les performances des codecs à mots de longueur variable peuvent aussi être évaluées au moyen de la méthode des facteurs de dégradation (§ 3.1.1).

La création d'un modèle de la vision doit faire intervenir deux niveaux de connaissance. Le premier concerne la visibilité d'une dégradation quelconque selon sa localisation dans l'image et le second porte sur la manière de déterminer comment la visibilité de toutes les dégradations doit être combinée pour conduire à une note de qualité globale. Il suffit donc de s'intéresser aux modèles prenant en compte les caractéristiques de dégradation des méthodes de codage numérique; il est, par exemple, inutile de considérer les distorsions de nature géométrique ou sémantique. Les modélisations de la réponse du système visuel humain aux distorsions dues à la transmission de l'image se sont concentrées, sur les phénomènes au seuil de visibilité, ou au voisinage, ce qui convient pour la télévision de haute qualité. On sait peu de choses sur la modélisation de la réponse à des distorsions plus importantes.

Une étude sur la conception d'un modèle de la vision pour la prévision de la qualité d'image a été réalisée. Cette étude examine la création de ce modèle et ses performances en tant qu'outil de prévision de la qualité subjective partir d'un estimateur basé sur des mesures brutes d'erreur, l'un représentant le filtrage visuel non linéaire, et l'autre tenant compte des propriétés de masquage spatial et temporel de la vision. On a employé comme support de cette étude les processus de distorsion de la quantification linéaire, du codage MICD, du bruit gaussien additif et du filtrage passe-bas. Il est particulièrement important de noter pour la création d'un modèle de mesure de la qualité d'une séquence d'images que les observateurs ont tendance à noter l'image selon la distorsion présente dans sa région la plus dégradée et non selon la moyenne pour toutes celles-ci. D'autres modèles de la vision ont été établis plus récemment pour les applications de codage numérique de l'image.

L'utilisation de modèles de la vision est très prometteuse pour la détermination objective de la qualité d'image en présence non seulement de dégradations dues au codage numérique, mais aussi de défauts causés par d'autres processus non linéaires ou adaptatifs. Des études complémentaires sur le sujet sont nécessaires.

4 Mesure objective de la qualité d'image des codecs en présence d'erreurs de transmission

Dans un système de transmission réel, la liaison entre le codeur et le décodeur sera soumise à des influences qui perturberont les données acheminées, de telle sorte qu'une importante caractéristique d'un décodeur est sa réponse à la présence de ces erreurs de transmission. Dans un codec bien conçu, la réponse en question prendra la forme de distorsions transitoires locales de l'image décodée et le nombre de ces transitoires sera en relation avec la répartition statistique des erreurs dans la voie, tandis que leur nature dépendra de l'algorithme de codage employé, ainsi que du caractère plus ou moins critique de la séquence d'images présentée. Le but des expériences faisant intervenir les erreurs de transmission est généralement d'établir pour un codec une représentation graphique des dégradations perçues par l'observateur pour une série de taux d'erreur binaires.

Un décodeur possède plusieurs niveaux de traitement qui peuvent déterminer sa réponse aux erreurs de transmission; certains peuvent être analysés mathématiquement ou être simulés sur ordinateur, tandis que d'autres exigent soit un certain degré d'évaluation subjective, soit la création d'un modèle de la réponse de l'observateur aux distorsions transitoires.

La première étape d'une analyse objective est de décrire aussi exactement que possible la manière dont les erreurs surviennent dans une liaison réelle, ce qui se fait généralement sous la forme d'un modèle statistique. Sous sa forme la plus simple, ce modèle admet que les erreurs se produisent aléatoirement et de manière indépendante (répartition de Poisson), mais l'on sait depuis longtemps, par observation, qu'en réalité les erreurs apparaissent en groupes ou en salves. On a proposé plusieurs modèles pour rendre compte de ce comportement, le plus connu étant basé sur une répartition de Neyman du type A. Alors que la loi de Poisson est entièrement définie par un seul paramètre, le taux d'erreur binaire moyen, le modèle Neyman A, en exige deux autres décrivant le degré de regroupement et la densité des erreurs dans chaque groupe. On ne dispose pas encore d'une Recommandation permettant de fixer ces deux paramètres à des valeurs réalistes.

Conscients de la présence possible de salves d'erreurs de transmission, les concepteurs de codecs prévoient souvent une opération de réarrangement temporel des bits à transmettre, avant leur introduction dans le canal. On obtient ainsi une dispersion des salves d'erreurs dans le canal lorsque les bits subissent le réarrangement inverse dans le décodeur, ce qui permet de mieux traiter les erreurs en question dans le système de correction qui suit. Celui-ci sera capable de corriger complètement un certain nombre d'erreurs en utilisant des données de redondances transmises dans une partie de la capacité de la voie, mais il subsistera quelques erreurs «résiduelles» qui parviendront au système de décodage de l'image. La répartition des erreurs résiduelles peut être calculée pour un codec et un modèle de canal donné, mais il reste à étudier leur effet sur l'image décodée.

L'UIT-R suggère que les performances d'un codec donné vis-à-vis des erreurs de transmission soient jugées en deux parties, d'abord subjectivement pour déterminer sa fonction caractéristique de dégradation puis objectivement, en tenant compte du taux d'erreur résiduel obtenu par le calcul à partir des considérations qui précèdent. On ne dispose pas actuellement de résultats expérimentaux confirmant ce principe, mais il pourrait toutefois constituer la première étape d'une mesure entièrement objective si la réponse de l'observateur aux différentes transitoires du codec peut être chiffrée. Il est important de noter que certains des bits transmis sont plus sensibles que d'autres aux perturbations, ce qui signifie que la réponse du codec à une erreur résiduelle sur un seul bit peut beaucoup varier et peut aussi dépendre du caractère plus ou moins critique de la séquence d'images à la source. C'est ainsi que dans les codecs intertrames, les transitoires provenant d'erreurs résiduelles peuvent se cantonner dans les parties fixes de l'image jusqu'au moment où des mesures sont prises pour les éliminer par rafraîchissement. Enfin, l'une des particularités de certains codecs à mots de longueur variable est qu'ils peuvent détecter quelques violations du codage causées par les erreurs de transmission et utiliser cette connaissance pour essayer de dissimuler les distorsions

transitoires. La dissimulation ne réussit pas avec toutes les erreurs, mais elle améliore généralement la qualité subjective de l'image produite, ce dont il faut tenir compte dans l'évaluation objective d'un codec.

5 Distorsions dans la transmission mixte analogique-numérique

Jusqu'à présent, on a étudié séparément les problèmes de définition de la qualité d'image pour les systèmes analogiques et numériques. Si le principe de l'indépendance psychologique des phénomènes de dégradation de la qualité d'image mentionné au § 3.1 est admissible, la technique décrite dans ce paragraphe est aussi applicable aux systèmes mixtes. En d'autres termes, les dégradations peuvent être réparties dans l'une des catégories suivantes, du point de vue de l'indépendance psychologique:

- a) dégradations causées uniquement par la section analogique;
- b) dégradations causées uniquement par la section numérique;
- c) dégradations causées par les sections analogique et numérique, susceptibles d'être des facteurs indépendants dans chaque système.

Les dégradations des groupes a) et b) seront traitées comme des facteurs indépendants et l'on a déjà proposé à l'UIT-R une fonction destinée à estimer la qualité d'image globale dans un tel cas. Cette fonction d'estimation est applicable lorsqu'il existe simultanément plusieurs facteurs psychologiquement indépendants.

En revanche, dans le groupe c), où les dégradations provenant des deux sections sont si semblables qu'on ne peut pas les considérer comme indépendantes, il faudra trouver un nouveau moyen d'attribuer les dégradations aux sections analogique et numérique avant d'appliquer la fonction d'estimation mentionnée plus haut.

Par exemple, des études ont montré que dans un cas de ce genre, où il y a combinaison d'un bruit aléatoire dans le système analogique et d'un bruit granulaire dans un système de codage MICD intratrame à mots de longueur fixe, il est possible de remplacer une mesure physique dans le système analogique par une valeur corrigée basée sur les différences de sensibilité de l'œil.
