

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
—  
**INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**  
—  
COURBEVOIE  
—

①1 N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

**3 085 519**

②1 N° d'enregistrement national : **18 57928**

⑤1 Int Cl<sup>8</sup> : **G 06 T 1/00 (2019.01)**

⑫

## BREVET D'INVENTION

**B1**

⑤4 PROCÉDE DE MESURE D'UN ESPACE DE COULEUR PROPRE A UN INDIVIDU ET PROCÉDE DE CORRECTION D'IMAGES NUMERIQUES EN FONCTION DE L'ESPACE DE COULEUR PROPRE A L'INDIVIDU.

②2 Date de dépôt : 04.09.18.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la demande : 06.03.20 Bulletin 20/10.

④5 Date de la mise à disposition du public du brevet d'invention : 13.01.23 Bulletin 23/02.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de recherche :

*Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : *CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Etablissement public — FR et UNIVERSITE GRENOBLE ALPES Etablissement public — FR.*

⑦2 Inventeur(s) : ALLEYSSON DAVID et MEARY DAVID.

⑦3 Titulaire(s) : CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Etablissement public, UNIVERSITE GRENOBLE ALPES Etablissement public.

⑦4 Mandataire(s) : IPAZ.

**FR 3 085 519 - B1**



- 5 Procédé de mesure d'un espace de couleur propre à un individu et procédé de correction d'images numériques en fonction de l'espace de couleur propre à l'individu

### **Domaine technique et État de la technique**

10

La présente invention se situe dans le domaine du traitement d'images et notamment dans le domaine du rendu des couleurs par différents moyens d'affichage.

L'invention propose une méthode de mesure d'un espace de couleur propre à un individu ainsi qu'une méthode de correction d'images numériques en fonction de l'espace couleur propre à l'individu.

L'invention cherche à définir un espace métrique de couleur pour un utilisateur face à un dispositif d'affichage.

L'espace de vision des couleurs a longtemps été construit selon un concept d'équivalence visuelle, ou métamérisme, entre les lumières monochromatiques.

Les lumières monochromatiques ont été utilisés dans le domaine de la photométrie pour mesurer la sensibilité globale de l'œil selon les différentes longueurs d'onde de la lumière.

Par ailleurs, il a été mis en évidence que l'œil n'a pas une sensibilité constante sur toutes les longueurs d'ondes de la lumière visible.

En ce qui concerne la vision des couleurs à proprement parler, la détermination d'un espace de couleurs est basée sur une expérience dite « colour matching experiment » décrite notamment par Siles, W.S. & Bruch J. M. dans l'article suivant : « NPL colour-matching investigation : final report ». Ainsi il a été déterminé un espace de vision de couleurs défini par une base de vecteurs RVB selon les longueurs d'ondes des trois couleurs primaires soit rouge, vert et bleu. Les vecteurs selon les couleurs primaires ont été linéairement transformés en fonctions spectrales XYZ positives. Les fonctions spectrales XYZ ont été normalisées par la Commission Internationale de l'Éclairage selon plusieurs normes CIE successives.

5            Cette paramétrisation par longueur d'onde de l'espace des couleurs présente plusieurs désavantages. Un premier désavantage est que le matériel pour réaliser les mesures est très difficile à calibrer et les expériences très fastidieuses à mener. Un autre désavantage est que même si les bases de construction des lumières monochromatiques sont très précises en  
10 termes de longueur d'onde, il est très difficile d'en gérer l'intensité. Ceci exclu donc de fait l'aspect non linéaire des fonctions de vision de la couleur selon son intensité.

### **Résumé de l'invention**

15

Un objectif de l'invention est notamment de proposer une méthode pour compenser un système d'affichage pour des particularités d'un espace couleur propre à un individu face à un afficheur particulier.

20

La présente invention propose à cette fin un procédé, mis en œuvre par ordinateur, de construction d'un espace de couleurs propre à un observateur visualisant une image en couleurs sur un dispositif d'affichage connecté audit ordinateur. Ledit procédé comprend au moins les étapes suivantes :

- 25            • une première étape de mesures de radiances spectrales émises par le dispositif d'affichage et capté par un dispositif de mesures de radiance ;
- 30            • une deuxième étape de construction d'un modèle affine des lumières produites par le dispositif d'affichage dans un espace de couleur orthogonal euclidien du dispositif d'affichage à partir des mesures de radiances spectrales ;
- une troisième étape de mesure d'un champ de vecteurs de luminance perçu par l'observateur placé devant le dispositif d'affichage et soumis à un stimulus défini dans l'espace de couleur orthogonal euclidien du dispositif d'affichage ;
- 35            • une quatrième étape de construction d'un espace hyperbolique représentant un espace de vision en couleurs propre à l'observateur placé devant le dispositif d'affichage à partir de champ de vecteurs de luminance mesuré.

5 Les mesures de radiance spectrales sont réalisées pour plusieurs va-  
leurs numériques DV représentant des consignes données au dispositif d'af-  
fichage par une carte graphique présente dans l'ordinateur. Les consignes  
permettent d'afficher une image sur chaque canal de couleur du dispositif  
d'affichage. Le modèle affine des lumières produites par le dispositif d'affi-  
10 chage est peut être défini en fonction des valeurs numériques DV et des  
valeurs de gain du dispositif d'affichage.

La deuxième étape de construction d'un modèle affine peut notam-  
ment comprendre :

- une étape de calcul de fonctions prototypes du dispositif d'affichage  
15 pour chaque canal de couleur en fonction des radiances spectrales  
mesurées ;
- une étape de calcul des gains du dispositif d'affichage pour chaque  
canal de couleur en fonction des radiances spectrales mesurées ;
- une étape d'interpolation des gains pour chaque canal de couleur du  
20 dispositif d'affichage entre les valeurs des radiances spectrales mesu-  
rées ;
- une étape de détermination d'une fonction non-linéaire vectorielle de  
l'espace des valeurs numériques DV vers l'espace des gains du dispo-  
sitif d'affichage.

25 Le calcul des fonctions prototype peut être réalisé par une méthode  
parmi :

- une utilisation des valeurs maximales des mesures de radiances sur  
chaque canal de couleur ;
- une décomposition de rang un en valeurs et vecteurs singuliers d'une  
30 matrice composée des valeurs des mesures de radiance spectrale  
pour chaque canal de couleur.

L'étape de transformation de l'espace de couleur orthogonal euclidien  
en un espace affine peut être réalisée par une méthode parmi :

- 35 • une première méthode dite par décorrélation ;
- une deuxième méthode par projection spectrale canonique ;
- une troisième méthode dite de Gram-Schmidt ;
- une quatrième méthode par décomposition en valeurs singulières.

5 L'étape de mesure d'un champ de vecteurs de luminance perçu par un observateur placé devant le dispositif d'affichage peut être réalisée par un ordinateur muni d'une interface entre l'ordinateur et l'observateur et connecté au dispositif d'affichage. Ledit ordinateur met en œuvre une méthode de type « minimum motion photometry » appliquée à l'observateur  
10 auquel on présente un stimulus défini dans l'espace de couleur euclidien orthogonal du dispositif d'affichage.

La première étape de mesure peut être mise en œuvre par un spectrophotomètre.

15 L'invention propose en outre un procédé mis en œuvre par ordinateur de correction d'images numériques en fonction d'un espace de couleurs propre à un observateur visualisant une image en couleur sur un dispositif d'affichage connecté à l'ordinateur. Ledit procédé qu'il comprend au moins les étapes suivantes :

- 20
- construction de l'espace de couleurs propre à l'observateur visualisant une image en couleur sur ledit dispositif d'affichage connecté audit ordinateur ;
  - détermination d'une fonction de conversion de points d'une image affichée par le dispositif d'affichage, lesdits points étant exprimés dans  
25 l'espace de couleur orthogonal euclidien du dispositif d'affichage, en des points d'un hyperboloïde calculé comme une surface de luminance constante à partir du champ de vecteur de luminance, exprimé dans l'espace hyperbolique représentant l'espace de vision en couleurs, propre à l'observateur ;
  - 30 • modification de paramètres de la fonction de conversion pour adapter l'image à l'observateur.

Chaque point  $x = [x_a, x_b, x_c]^T$  de l'espace de couleur orthogonal euclidien du dispositif d'affichage peut être transformé en un point  $z = [z_1, z_2, z_3]^T$  dans l'espace hyperbolique représentant l'espace de vision en couleurs,  
35 propre à l'observateur, suivant les paramètres  $(k, t, \theta)$ , tel que :

$$k = \sqrt{(x - X0)^T R (x - X0)}$$

5

$$z = \begin{bmatrix} k \sinh(t) \cos(\theta) \\ k \sinh(t) \sin(\theta) \\ k \cosh(t) \end{bmatrix}$$

avec  $t = \operatorname{arccosh}\left(\frac{z_3}{k}\right)$  ;  $\theta = \arctan\left(\frac{z_2}{z_1}\right)$

Le paramètre  $k$  peut être adapté en le fixant à une valeur constante pour réaliser une adaptation de l'image présentée par le dispositif d'affichage à un niveau de luminance constant pour l'observateur, placé devant le dispositif d'affichage.

Le paramètre  $k$  peut alternativement être adapté en réduisant sa variance pour diminuer l'adaptation de l'observateur à la différence de luminance entre les différentes régions de l'image.

15 La présente invention porte également sur un dispositif de mesure d'un espace de couleurs propre à un observateur et de correction d'images numériques en fonction de l'espace de couleurs propre à l'observateur, caractérisé en ce qu'il comprend :

- un dispositif d'affichage d'une image couleur ;
- 20 • un dispositif de mesure d'une radiance spectrale émise par le dispositif d'affichage ;
- un dispositif de calcul d'un espace de couleur propre à un individu à partir de la radiance spectrale mesurée et de l'image couleur affichée, et un procédé de correction d'images numériques, comprenant au
- 25 moins : un processeur de calculs, un dispositif d'enregistrement et de stockage de données, une interface avec le dispositif de mesure et une interface avec le dispositif d'affichage, une interface avec l'observateur.

30 L'invention concerne également un produit programme d'ordinateur comprenant des instructions qui, lorsque le programme est exécuté par un ordinateur, conduisent celui-ci à mettre en œuvre les étapes du procédé de correction d'images.

35 L'invention porte aussi sur un support d'enregistrement lisible par ordinateur comprenant des instructions qui, lorsqu'elles sont exécutées par un

5 ordinateur, conduisent celui-ci à mettre en œuvre les étapes du procédé de correction d'images.

### Description des figures

10 D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront à l'examen de la description détaillée de plusieurs modes de réalisation nullement limitatifs, et des dessins annexés, sur lesquels :

- La figure 1 représente plusieurs étapes générales de la méthode selon l'invention ;
- 15 - La figure 2 représente un dispositif de mise en œuvre de l'invention ;
- La figure 3 représente une mesure d'une radiance émise par un afficheur pour les canaux rouge, vert et bleu pris en isolation ;
- La figure 4 représente un schéma général d'un modèle affine de la  
20 lumière produite par un écran ;
- La figure 5 représente une application du modèle affine de la lumière produite par l'écran dans l'espace CIE-xy ;
- La figure 6 représente les relations entre un espace orthogonal ABC, l'espace affine des lumières et l'espace des gains de l'écran ;
- 25 - La figure 7a représente des composantes ABC obtenues par une première méthode de décorrélation ;
- La figure 7b représente des composantes ABC obtenues par projection canonique ;
- La figure 7c représente des composantes ABC obtenues par la méthode de Gram-Schmidt ;
- 30 - La figure 7d représente des composantes ABC obtenues par une méthode de décomposition en valeurs singulières d'application linéaire ;
- La figure 8a représente, dans l'espace de ABC, les composantes  
35 *RGBI* selon la méthode de décorrélation ;
- La figure 8b représente, dans l'espace de ABC, les composantes *RGBI* selon la méthode de projection canonique ;

- 5       - La figure 8c représente, dans l'espace de ABC, les composantes *RGBI* selon la méthode de Gram-Schmidt ;
- La figure 8d représente, dans l'espace de ABC, les composantes *RGBI* selon la méthode de décomposition en valeurs singulières d'application linéaire ;
- 10      - La figure 9a représente dans le repère ABC, le plan P1 dans lequel est construit un stimulus de « minimum motion » ;
- La figure 9b représente l'équation du stimulus de « minimum motion » ;
- La figure 10 représente une construction spatiale du stimulus de « minimum motion » ;
- 15      - La figure 11a représente une rotation d'un repère  $(p, i, j)$  du plan P1 ;
- La figure 11b représente un plan P2 colinéaire à la direction d'un mouvement minimal perçu dans P1 ;
- 20      - La figure 12a représente une procédure d'estimation du seuil de perception d'un mouvement minimal défini par une rotation dans le repère de P1 ;
- La figure 12b représente une procédure d'estimation d'un seuil de perception d'un mouvement minimal en fonction de la rotation ;
- 25      - La figure 13a représente un résultat d'une mesure d'un champ de vecteurs de luminance pour un premier observateur, en quinze points de mesures répartis sur une sphère de rayon unité dans le repère ABC ;
- La figure 13b représente un résultat de mesure d'un champ de vecteurs de luminance pour un premier observateur, sur quinze points de mesures répartis sur une sphère de rayon quatre dans le repère ABC ;
- 30      - La figure 13c représente des surfaces de luminance constante pour le premier observateur dans le repère ABC ;
- 35      - La figure 13d représente des surfaces de luminance constante pour un deuxième observateur dans le repère ABC ;

- 5           - La figure 14 représente un exemple de représentation conjointe de l'espace de l'écran et de l'espace de l'observateur dans un espace commun, ABC ;
- La figure 15 représente un schéma de conversion entre un espace de radiance d'une scène, un espace de gain d'une caméra, et un
- 10           espace de gain d'un afficheur ;
- La figure 16 représente un modèle général de transformation entre l'afficheur et l'observateur.

### **Description détaillée**

15

La présente invention traite, à titre d'exemple d'application, d'une méthode 1 pour compenser un système d'affichage adapté à des particularités propres à un espace couleur d'un individu, ou observateur, faisant face à un afficheur particulier. La présente méthode comprend plusieurs étapes principales représentées sur la figure 1. Ces différentes étapes peuvent être appliquées à plusieurs domaines différents.

20

Une première étape générale 2 peut être une étape de construction d'un espace radiométrique de couleur Euclidien muni d'un produit scalaire, d'une propriété d'orthogonalité, associé à un afficheur, ou dispositif d'affichage particulier, comme un écran d'ordinateur.

25

Une deuxième étape 3 peut être une étape de mesure du champ de vecteurs de luminance vu par un observateur particulier dans l'espace Euclidien précédemment défini.

Une troisième étape 4 peut être une étape de construction d'un espace hyperbolique, à partir du champ de vecteurs, représentatif de l'espace de vision en couleur de l'observateur faisant face à l'afficheur.

30

Les première, deuxième et troisième étapes font parties d'un procédé dit de construction d'un espace de couleur propre à un individu visualisant une image couleur sur un dispositif d'affichage.

Une quatrième étape 5 peut être une étape de compensation des images numériques adaptée audit observateur regardant l'afficheur.

35

La quatrième étape 5 peut être différente selon les modes d'applications particuliers.

5           La quatrième étape peut faire partie d'un procédé de correction  
d'images numériques en fonction d'un espace de couleur propre à un indi-  
vidu comprenant également une étape préalable à la quatrième étape 5 :  
une étape de mise en œuvre du procédé de construction d'un espace de  
couleur propre à un individu visualisant une image couleur sur un dispositif  
10 d'affichage.

Les différentes étapes de la méthode selon l'invention sont décrites  
plus en détail par la suite.

La présente invention utilise avantageusement une propriété particu-  
lière de l'espace des métriques des couleurs d'un observateur humain : à  
15 savoir que cet espace métrique est hyperbolique. Les axes et les courbures  
de cet espace métrique dépendent d'un observateur particulier face à un  
dispositif d'affichage particulier.

La figure 2 représente un exemple d'un dispositif de mise en œuvre  
20 de la méthode 1 selon l'invention telle que représentée sur la figure 1.

La première étape 2 de construction d'un espace de couleur Euclidien  
associé à un afficheur 6 peut être mise en œuvre par un ordinateur 7 com-  
prenant notamment au moins une unité de stockage comprenant des ins-  
tructions de programme aptes à s'exécuter sur au moins un processeur de  
25 l'ordinateur 7. Les instructions du programme implémentent les étapes né-  
cessaires à la mise en œuvre de la méthode selon l'invention. La figure 2  
représente des caractéristiques techniques du dispositif d'affichage 6  
comme la taille D de la diagonale de son écran ainsi que des dimensions h  
et v de l'écran et de l'image projetée. L'espace de couleur Euclidien est  
30 construit à l'aide de mesures de luminances réalisées par un spectrophoto-  
mètre 9.

La deuxième étape 3 de mesure du champ d'un vecteur de luminance  
d'un observateur particulier est mise en œuvre par l'ordinateur 6 disposant  
d'une interface, non représentée, permettant au programme d'ordinateur  
35 d'interagir avec l'observateur 8, notamment en recevant par l'intermédiaire  
de cette interface les réactions de l'observateur en présence d'un stimulus  
affiché sur l'écran, ou afficheur 6.

5 Les troisième et quatrième étapes 4, 5 sont également mises en œuvre par l'ordinateur 7.

La première étape 2 de construction d'un espace de couleur Euclidien associé à l'afficheur est décrite ci-après.

10 De manière générale, un afficheur 6 produit des lumières qui peuvent être caractérisées par leurs radiances spectrales. Prenons pour illustrer l'exemple d'un afficheur 6 disposant de trois degrés de liberté colorimétrique : rouge, vert et bleu. Une généralisation à un afficheur disposant de plus de composantes de couleurs est également possible par extension.

15 Pour mesurer la radiance spectrale de l'afficheur 6, il est possible d'utiliser le spectrophotomètre 9. La radiance spectrale de l'afficheur 6 correspond à une valeur numérique dite DV, pour Digital Value en langue anglo-saxonne, appelée aussi valeur digitale. La valeur numérique est une consigne donnée à l'afficheur 6 par une carte vidéo de l'ordinateur 7 afin d'afficher une image sur chaque canal de couleur rouge, vert ou bleu. La carte vidéo pilote l'afficheur 6 par le moyen des consignes en valeur DV.

20 Dans l'exemple représenté sur la figure 2, l'image à mesurer s'étend sur un tiers de l'écran respectivement en longueur  $h$  et en hauteur  $v$ . Le fond de l'écran de l'afficheur 9 peut être éclairé par un gris de luminance moyenne correspondant par exemple à une valeur digitale de 0,74 pour les canaux rouge, vert et bleu.

Pour la mise en œuvre de la première étape 2 de construction d'un espace de couleur Euclidien associé à l'afficheur 6, on choisit des valeurs digitales  $DV_m$  qui couvrent l'ensemble du domaine spectral possible avec un pas régulier sur chacun des canaux de l'afficheur. Les mesures de radiance sont réalisées avec ces valeurs digitales  $DV_m$ .

L'ensemble  $DV_m$  peut être décrit par un ensemble de  $N_{DV}$  valeurs digitales prises entre zéro et un. Pour l'exemple  $N_{DV} = 18$ . Ainsi :

$$DV_m = \left[ 0, \frac{1}{N_{DV}-1}, \frac{2}{N_{DV}-1}, \dots, 1 \right]^T (1000)$$

35 Avantagement,  $N_{DV}$  peut prendre toute valeur correspondant à la limite de la résolution couleur de l'afficheur. Par exemple, pour un système 8bits par canaux de couleur il est possible de choisir jusqu'à 256 valeurs

5 différentes. Dans un autre exemple, pour un système 15bits par canaux de couleur, il est possible de choisir jusqu'à  $2^{15}$  valeurs différentes.

Des mesures de radiances pour l'ensemble des  $DV_m$  qui pilotent les canaux rouge, vert et bleu de l'écran sont réalisées à l'aide du spectrophotomètre. Chaque canal rouge, vert, bleu est mesuré en isolation par rapport  
10 aux autres canaux et également en combinaison avec un ou deux autres des trois canaux afin de vérifier les performances d'additivité des couleurs de l'afficheur 6.

Si l'on choisit la matrice  $DV_{all}$  de l'ensemble des vecteurs des valeurs digitales appliquées sur les différents canaux, de taille  $(7 * 18 = 126) \times 3$ , elle  
15 peut s'exprimer comme suit :

$$DV_{all} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \otimes DV_m \quad (1001)$$

On suppose par exemple que le spectrophotomètre fournit  $n\lambda = 401$  valeurs spectrales pour la radiance, couvrant le domaine spectral de 380nm à 780nm avec un pas de 1nm. On appelle  $m(\lambda, DV_{all}^T)$  la matrice de taille 401  $\times$   
20 126 contenant l'ensemble des radiances spectrales mesurées pour toutes les valeurs digitales.

Dans la suite, un modèle affine des lumières produites par l'afficheur 6 est construit.

25 La figure 3 représente un exemple de mesure de radiance sur les canaux rouge 30, vert 31 et bleu 32 en isolation pour dix-huit valeurs de  $DV$  entre 0 et 1, pour un afficheur de type CRT, acronyme pour Cathode Ray Tube en langage anglo-saxon, ou écran à tube cathodique. Arbitrairement, l'unité énergétique spectrale est 683.02 W/str/m<sup>2</sup>/nm. La constante 683.02  
30 représente une efficacité lumineuse spectrale maximale en lumen/W dans le domaine photopique. L'utilisation de cette valeur constante particulière permet de faire en sorte que le produit scalaire d'une radiance spectrale  $r(\lambda)$  par  $V(\lambda)$ , une fonction d'efficacité lumineuse spectrale, donne directement la luminance.

5 En normalisant ainsi les énergies, le calcul d'une luminance en  $\text{cd/m}^2$  s'opère comme un produit scalaire entre la radiance spectrale  $r(\lambda)$  et la fonction d'efficacité lumineuse spectrale  $V(\lambda)$ .

Sur la figure 3, l'axe des abscisses représente la longueur d'onde  $\lambda$  en nanomètres et l'axe des ordonnées représente la radiance spectrale multiple  
10 de  $683,02 \text{ W/str/m}^2/\text{nm}$ .

Dans un premier temps, on construit un modèle affine de prédiction des mesures de radiance  $m(\lambda; DV^T)$  à partir des valeurs de  $DV$ . Ensuite on construit un espace Euclidien orthogonal associé à l'afficheur tel que décrit  
15 dans la suite.

Le schéma général du modèle affine de la lumière produite par un écran est représenté sur la figure 4. La figure 4 représente donc un modèle affine de production de lumière  $m$  par un afficheur en fonction de la valeur  
20 digitale  $d$  donnée à la carte vidéo. Sur la figure 4 sont représentés trois espaces : l'espace des valeurs digitales  $DV$  représenté par le repère  $(0, DV_R, DV_G, DV_{Bl})$ , l'espace des gains de l'afficheur représenté par le repère  $(0, g_R, g_G, g_{Bl})$  et l'espace des lumières représenté par le repère  $(m_0, R, G, Bl)$ .

À partir d'un vecteur de valeurs digitales  $d = [d_R, d_G, d_{Bl}]^T$  donné  
25 comme consigne à la carte vidéo, on produit un vecteur de gain  $g = [g_R, g_G, g_{Bl}]^T$  à travers une fonction vectorielle non linéaire  $\Gamma$ . Le vecteur de gain exprime un gain compris entre 0 et 1 sur les fonctions prototypes de lumière émises par l'afficheur à travers un modèle affine de matrice  $M$  et de décalage à l'origine  $m_0$ .

30 Tel que représenté sur la figure 4, le modèle affine peut s'écrire :

$$m(\lambda, DV(i)^T) = Mg + m_0 = M\Gamma(DV) + m_0 \quad (1003)$$

En supposant la propriété d'additivité de l'afficheur, il est possible de n'utiliser que les mesures des canaux rouge, vert et bleu en isolation pour prédire l'ensemble des mesures.

35 Dans la suite, la radiance spectrale correspondant à une valeur mesurée est notée  $m(\lambda, DV(i)^T)$ . Le décalage à l'origine  $m_0$  est estimé comme la moyenne des valeurs mesurées pour  $DV(i) = [0,0,0]^T$ . En effet, on peut par exemple mesurer sept fois la radiance spectrale pour cette valeur digitale,

5 c'est-à-dire une fois pour chaque couleur rouge, vert, bleu, jaune, magenta, cyan et gris. Ainsi :

$$m_0 = \overline{m(\lambda, [0,0,0]^T)} \quad (1004)$$

Ensuite, il est possible de calculer de deux manières différentes les fonctions prototypes de l'écran.

10

Une première façon de choisir les fonctions prototypes est d'utiliser les maxima des mesures sur les canaux rouge, vert, bleu :

$$\begin{aligned} R(\lambda) &= m(\lambda, [1,0,0]^T) - m_0 \\ G(\lambda) &= m(\lambda, [0,1,0]^T) - m_0 \\ Bl(\lambda) &= m(\lambda, [0,0,1]^T) - m_0 \end{aligned} \quad (1005)$$

15

Les gains sont alors donnés par :

$$\begin{aligned} g_R(i) &= (R(\lambda)^T R(\lambda))^{-1} (m(\lambda, [DV(i), 0, 0]^T) - m_0) \\ g_G(i) &= (G(\lambda)^T G(\lambda))^{-1} (m(\lambda, [0, DV(i), 0]^T) - m_0) \\ g_{Bl}(i) &= (Bl(\lambda)^T Bl(\lambda))^{-1} (m(\lambda, [0, 0, DV(i)]^T) - m_0) \end{aligned} \quad (1006)$$

20

Une deuxième façon de choisir les fonctions prototypes est d'utiliser une décomposition de rang un. Pour l'exemple le canal choisi est le canal rouge mais la méthode est également applicable pour les canaux vert et bleu.

25

On réalise donc une décomposition en valeurs  $s$  et vecteurs  $u$  singuliers de la matrice des mesures pour le canal rouge :

$$m(\lambda, [DV(i), 0, 0]) = usv^T \quad (1007)$$

$$R'(\lambda) = |u(:,1)|\sqrt{|s(1,1)|} \quad (1008)$$

$$g'_R(i) = \sqrt{|s(1,1)|}|v(:,1)| \quad (1009)$$

30

Cependant, la décomposition de rang 1 ne garantit pas que les gains soient compris entre 0 et 1. Les valeurs sont donc corrigées de la manière suivante :

$$R(\lambda) = R'(\lambda)g'_R(n_{DV}) \quad (1010)$$

35

$$g_R(i) = g'_R(i)/g'_R(n_{DV}) \quad (1011)$$

5 La matrice  $M$  est alors composée des fonctions prototypes suivantes :

$$M = \begin{bmatrix} R(\lambda_1) & G(\lambda_1) & Bl(\lambda_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R(\lambda_{N_\lambda}) & G(\lambda_{N_\lambda}) & Bl(\lambda_{N_\lambda}) \end{bmatrix} \quad (1012)$$

10 Les valeurs de gains sont les valeurs exactes pour les lumières mesurées. Cependant, pour être capable de prédire la radiance pour des valeurs quelconques de valeur digitale, il convient d'interpoler les gains entre les valeurs mesurées. À cette fin, on définit la fonction vectorielle suivante :

$$\Gamma : DV \rightarrow g, g = [g_R, g_G, g_{Bl}]^T = \Gamma(DV) = \Gamma([DV_R; DV_G; DV_{Bl}]^T) \quad (1013)$$

15 Cette fonction  $\Gamma$  est une fonction définie en  $N$  morceaux de la manière suivante pour chacun des canaux de couleur  $c$  :

$$\Gamma^c(DV_c) = \{i = [1, \dots, N]; \Gamma_i(x) = a_i + b_i x^{\gamma_i}; x_{i-1} \leq x \leq x_i; x_0 = 0; x_N = 1; a_1 = 0; b_N = 1\} \quad (1014)$$

20 Ensuite, on ajoute à cette fonction par morceaux deux conditions : la première condition est que les morceaux contigus se recollent entre eux, la deuxième condition est que les dérivées à droite et à gauche au point de recollement soient égales. Ces deux conditions mènent aux équations suivantes :

$$\begin{cases} \Gamma_{i-1}(x_{i-1}) = \Gamma_i(x_{i-1}) \\ \frac{\partial \Gamma_{i-1}}{\partial x}(x_{i-1}) = \frac{\partial \Gamma_i}{\partial x}(x_{i-1}) \end{cases} \Rightarrow a_i, b_i \text{ constrained} \quad (1015)$$

25

Les deux conditions permettent de déterminer l'ensemble des paramètres  $a_i$  et  $b_i$ . Il reste ensuite à déterminer les paramètres  $x_i$  et  $\gamma_i$  pour que la fonction  $\Gamma^c$  soit entièrement déterminée. Les paramètres  $x_i$  et  $\gamma_i$  représentant respectivement les abscisses et les rayons de courbures des points de recollement entre les morceaux de la fonction  $\Gamma^c$ .

30

Les paramètres  $x_i$  et  $\gamma_i$  peuvent être calculés par une optimisation non linéaire aux moindres carrés entre les valeurs  $DV$  et les gains mesurés.

35 On utilise l'ensemble des points mesurés pour les canaux  $RGBL$  (pour Red, Green, Blue ou Rouge, Vert, Bleu) pour lesquels nous disposons de la valeur  $DV(i)$  de consigne, et pour lesquels nous pouvons calculer le

5 gain  $g$  par  $g_i = M^{-1}(m - m_0)$ . À l'aide des dix-huit couples  $(DV(i), g_i)$  on utilise une régression non-linéaire pour trouver les meilleurs valeurs  $(x_i, \gamma_i)$ . Les valeurs limites sont  $a_0 = 0$  et  $b_N = 1$ ,  $x_0 = 0$ ,  $x_N = 1$ . La position des morceaux, ainsi que la courbe exponentielle gamma, qui gouverne la courbe du morceau, sont calculés par régression non linéaire.

10 Par ailleurs, l'ensemble de ces paramètres est à déterminer pour chacun des canaux rouge, vert et bleu.

La fonction inverse de  $\Gamma_i$  est également entièrement définie par ces paramètres  $x_i$  et  $\gamma_i$  :

$$x = \Gamma_i^{-1}(y) = \left(\frac{y-a_i}{b_i}\right)^{1/\gamma_i} ; y_{i-1} = \Gamma_{i-1}(x_{i-1}) \leq y \leq y_i = \Gamma_i(x_i) \quad (1016)$$

15 La transformation affine inverse  $M^*$  est donnée par

$$M^* = (M^T M)^{-1} M^T \quad (1017)$$

selon les modèles proposés par J. Cohen & Kappauf, dans W. E. (1985). Color mixture and fundamental metamers: Theory, algebra, geometry, application. *The American journal of psychology*, 171-259,

20 et

$$g = M^*(m - m_0) \quad (1018)$$

La figure 5 représente une application du modèle affine dans un diagramme chromatique (tronqué) selon le système colorimétrique CIE-xy. Les abscisses et ordonnées sont respectivement les valeurs de  $x$  et de  $y$  dans le diagramme chromatique. Classiquement la droite 52 est la ligne des couleurs pourpres et les courbes 51 et 53 sont les limites du spectrum locus définissant les limites de la capacité de vision des couleurs par un être humain. Un triangle 50 représente un gamut de l'afficheur, c'est-à-dire un ensemble de couleurs affichables par ledit afficheur. Le triangle peut se transformer en carré ou pentagone si l'on utilise quatre ou plus de couleurs primaires pour générer les lumières. Les croix représentent chaque coordonnée dans l'espace CIE-xy des radiances mesurées. Les cercles représentent les coordonnées xy des radiances spectrales simulées à travers le modèle affine de l'équation (1003) à partir des vecteurs de  $DV$  correspondant aux points de mesure. La figure 5 met en avant la précision du modèle affine utilisé : on constate en effet une bonne correspondance

5 entre les cercles et les croix. Cette précision est avantageusement due à la qualité de l'approximation de la fonction  $\Gamma$  qui est ici définie en cinq morceaux.

10 Ensuite, on construit un espace orthogonal Euclidien de la manière suivante :

Le modèle affine de production de la lumière par un afficheur n'est pas associé à un espace métrique. Si l'on définit le produit scalaire naturel dans les espaces de Hilbert  $H$ , représentant l'espace des lumières, ledit produit scalaire naturel est défini par :

15 
$$\langle f_1(\lambda) | f_2(\lambda) \rangle = \int_{380}^{780} f_1(\lambda) f_2(\lambda) d\lambda = \mathbf{f}_1^T \mathbf{f}_2 \quad (1019)$$

où  $f_1(\lambda)$  et  $f_2(\lambda)$  sont deux radiances spectrales et  $\mathbf{f}_1$  et  $\mathbf{f}_2$  sont les vecteurs correspondants aux valeurs échantillonnées ; si l'on applique ce produit scalaire au calcul d'une matrice d'autocorrélation  $C_a$  de l'espace vectoriel de l'écran, on obtient :

20 
$$C_a = M^T M = \begin{bmatrix} 81 & 3.7 & 0.99 \\ 3.7 & 29 & 4.3 \\ 0.99 & 4.3 & 29 \end{bmatrix} \neq \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1020)$$

Cette matrice d'autocorrélation  $C_a$  est manifestement différente de l'unité. Cette différence est due à la corrélation entre les canaux rouge, vert et bleu ainsi qu'à la norme des vecteurs de ces canaux qui est différente de un.

25

Pour rendre l'espace affine de l'afficheur orthogonal, il est possible d'utiliser notamment un des quatre méthodes suivantes :

- une première méthode dite par décorrélation ;
- une deuxième méthode par projection spectrale canonique ;
- 30 • une troisième méthode par la méthode de Gram-Schmidt ;
- une quatrième méthode par décomposition en valeurs singulières de l'application linéaire.

D'autres méthodes peuvent bien entendu être utilisées.

35

La première méthode pour rendre l'espace affine de l'afficheur principal orthogonal est par exemple la méthode par décorrélation.

5 Une manière de rendre la matrice de corrélation unitaire est d'effectuer le changement de variable suivant :

$$T^{-1} = C_a^{-\frac{1}{2}}; N = MT^{-1} \quad (1021)$$

Il est alors aisé de vérifier que  $N^T N = Id$  et que  $N$  est une matrice contenant des vecteurs orthonormés. La matrice  $N$  orthonormée définit un espace orthogonal associé à l'afficheur 6 : c'est un espace Euclidien correspondant à l'afficheur 6 dans lequel la norme et l'orthogonalité sont clairement définis. Nous appellerons ABC les trois vecteurs qui composent la matrice  $N$  et qui forment les vecteurs de base de l'espace orthonormé. Puisque la matrice  $N$  est orthonormée, la transformation inverse est donnée par  $N^{-1} = N^T$ .

La figure 6 représente les relations entre l'espace orthogonal ABC, l'espace affine des lumières  $RGBI$  et l'espace des gains  $(g_R, g_G, g_{Bl})$  de l'afficheur 6 : à partir du modèle affine  $RGBI$  de la lumière produite par l'afficheur 6 on construit un espace orthonormé ABC associé à l'afficheur 6. On définit la transformation  $N$  qui permet le passage de l'espace des lumières  $RGBI$  à l'espace orthonormé ABC et  $T$  la transformation qui permet de passer de l'espace orthonormé ABC à l'espace des gains  $(g_R, g_G, g_{Bl})$  de l'afficheur 6.

On définit alors le vecteur  $t_0 = N^T m_0$  qui est le correspondant dans l'espace ABC du décalage  $m_0$  dans l'espace affine  $RGBI$ . La transformation entre l'espace ABC et l'espace des gains est alors définie pour la variable  $a$  de l'espace ABC et la variable  $g$  dans l'espace des gains par :

$$g = T^{-1}(a - t_0); T = (T^{-1})^{-1} = C_a^{\frac{1}{2}}; a = Tg + t_0 \quad (1022)$$

L'intérêt de cette dernière transformation est de pouvoir définir un stimulus dans ABC directement et de pouvoir le générer sur l'écran en le transformant dans l'espace des gains avec les équations (1022) et ensuite dans l'espace des valeurs digitales avec la fonction  $\Gamma^{-1}$  définie par les équations (1016).

La deuxième méthode pour rendre l'espace affine de l'afficheur principal orthogonal est la méthode par projection canonique. Cette projection utilise un projecteur dit de Cohen, elle est aussi nommée méthode de décomposition du projecteur spectral.

5 Cette autre façon de définir l'espace orthonormé associé à l'afficheur consiste à utiliser la matrice  $R$  de projection spectrale définie par J. Cohen & Kappauf dans l'article précédemment cité. Cette matrice  $R$  de projection spectrale permet de définir un opérateur de projection qui lie l'espace des lumières avec l'espace des gains directement dans l'espace de Hilbert des lumières, muni de son produit scalaire selon l'équation (1019).  
10 Cette matrice de projection permet de définir la projection orthogonale qui projette n'importe quelle lumière, définie par sa radiance spectrale, dans le sous-espace vectoriel des lumières affichables par l'écran. Cette projection est définie par la matrice  $R$  suivante :

15 
$$R = M(M^T M)^{-1} M^T \quad (1023)$$

On peut vérifier aisément que cet opérateur spectral  $R$  est un projecteur car il est idempotent :  $RR = R^2 = R$ . Cependant le projecteur  $R$  n'est pas sous sa forme canonique. Pour le rendre canonique on décompose le projecteur  $R$  à l'aide de la décomposition en valeurs singulières  
20 suivante :

$$R = u s v^T \quad (1024)$$

On peut vérifier que cette décomposition produit une matrice diagonale  $s$  de valeurs singulières qui contient seulement trois valeurs non nulles et égales à un. On peut donc réécrire  $R$  de la manière suivante :

25 
$$R = [u_1 \quad u_2] \begin{bmatrix} s_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1^T \\ v_2^T \end{bmatrix} = u_1 v_1^T = NN^T \quad (1025)$$

La matrice  $N$  de projection des lumières dans l'espace orthogonal ABC est donc ici directement calculée à partir des vecteurs singuliers de la matrice de projection. La conversion de l'espace orthogonal ABC vers l'espace des gains est alors donnée par :

30 
$$T = N^T M, T^{-1} = (T)^{-1}, t_0 = N^T m_0 \quad (1026)$$

La troisième méthode pour rendre l'espace affine de l'afficheur principal orthogonal est la méthode de Gram-Schmidt.

Historiquement, les espaces orthogonaux sont construits à partir  
35 d'espaces dont la base n'est pas orthogonale, grâce à la méthode dite de Gram-Schmidt. L'avantage de cette méthode est que l'on peut conserver la direction d'une des composantes de l'espace, la normaliser, et ensuite

5 modifier les autres composantes pour qu'elles soient unitaires et orthogonales à la première. Par exemple, on peut choisir la composante verte comme un premier vecteur et transformer les composantes rouges et bleu pour garantir l'orthogonalité avec le premier vecteur.

Appelons  $R$ ,  $G$  et  $Bl$  les vecteurs des composantes de  $M$  :  $M =$   
 10  $[R \ G \ Bl]$ .

Ensuite l'opérateur de projection orthogonal sur une droite vectorielle de vecteur directeur  $u$  peut être défini selon la méthode de Gram-Schmidt par :

$$proj_u(v) = \frac{\langle u,v \rangle}{\langle u,u \rangle} u \quad (1027)$$

15

La transformation de l'espace affine des lumières  $RGBl$  vers l'espace orthonormé  $ABC$  est alors donnée par les relations suivantes si  $B$  devient  $G$  normalisé :

$$\begin{aligned} G' &= G & B &= \frac{G'}{\|G'\|} \\ R' &= R - proj_{G'}(R) & A &= \frac{R'}{\|R'\|} \\ B' &= Bl - proj_{G'}(Bl) - proj_{R'}(Bl) & C &= \frac{Bl'}{\|Bl'\|} \end{aligned} \quad (1028)$$

20

On construit alors la matrice  $N = [A \ B \ C]$  et on en déduit la transformation  $T$  de l'espace orthonormé  $ABC$  vers l'espace des gains tel que dans l'équation (1026).

25 La quatrième méthode pour rendre l'espace affine de l'afficheur principal orthogonal est la méthode par décomposition en valeurs singulières de l'application linéaire.

La matrice  $M$  peut être vue comme une application linéaire entre l'espace des lumières  $RGBl$  et l'espace des gains. On peut déterminer directement une application orthogonale et unitaire à partir de  $M$  à l'aide  
 30 d'une décomposition en valeurs singulières. Comme la matrice est de rang trois, il n'y a que trois valeurs singulières et il est possible de simplifier la décomposition :

$$M = u s v^T = [u_1 \ u_2] \begin{bmatrix} s_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1^T \\ v_2^T \end{bmatrix} \quad (1029)$$

5            La matrice  $N$  est lors directement donnée par  $N = u_1$ . La transformation entre l'espace orthonormé ABC et l'espace des gains est ensuite également donnée par l'équation (1026).

10            Les figures 7a, 7b, 7c, 7d représentent les composantes A, B, C obtenues à partir de chacune des méthodes pour rendre l'espace affine de l'afficheur principal orthogonal précédemment décrites. Les figures 7a, 7b, 7c, 7d représentent des radiances spectrales en tant que multiples de 683,02 W/str/m<sup>2</sup>/nm, en fonction des longueurs d'onde  $\lambda$  en nm.

15            La figure 7a représente les composantes ABC obtenues par la première méthode de décorrélation.

              La figure 7b représente les composantes ABC obtenues par projection canonique ou projecteur de Cohen.

              La figure 7c représente les composantes ABC obtenues par la deuxième méthode de Gram-Schmidt.

20            La figure 7d représente les composantes ABC obtenues par la méthode par décomposition en valeurs singulières de l'application linéaire.

25            Les méthodes présentées ne forment pas une description exhaustive de toutes les méthodes possibles pour convertir un espace supporté par une famille libre, en espace orthonormé. On peut citer par exemple les méthodes de séparation de sources comme autres méthodes.

30            Toutes ces méthodes sont équivalentes à une rotation près. En effet, il peut être vérifié que chacune des fonctions ABC peut être obtenue à partir de la décomposition donnée par la décorrélation, en appliquant une rotation tridimensionnelle.

35            Il est possible de représenter l'espace tridimensionnel ABC associé, et de représenter les vecteurs  $R, G, Bl$  contenus dans la matrice  $M$  et décalés de  $m_0$  qui définissent l'espace affichable par l'afficheur, tel que représenté sur les figures 8a, 8b, 8c, 8d. Les coordonnées des composantes  $R, G, Bl$  dans l'espace  $RGBl$  sont données par les trois vecteurs colonnes qui composent la matrice  $T$ . Les figures 8a, 8b, 8c, 8d présentent les vecteurs

5  $R, G, Bl$  sur une représentation tridimensionnelle dans l'espace ABC engendré selon chacune des méthodes pour rendre l'espace affine de l'afficheur orthogonal.

La figure 8a représente dans l'espace ABC les composantes  $R, G, Bl$  selon la méthode de décorrélation.

10 La figure 8b représente dans l'espace ABC les composantes  $R, G, Bl$  selon la méthode de projection canonique ou projecteur de Cohen.

La figure 8c représente dans l'espace ABC les composantes  $R, G, Bl$  selon la méthode de Gram-Schmidt. Cette méthode permet avantageusement d'éviter des erreurs sur les transformations et évite de les confondre  
15 avec leurs transposées.

La figure 8d représente dans l'espace ABC les composantes  $R, G, Bl$  selon la méthode de décomposition en valeurs singulières de l'application linéaire.

20 La méthode de Gram-Schmidt peut par exemple être utilisée dans le cadre de l'invention. Avantageusement, la méthode de Gram-Schmidt permet de vérifier le bien-fondé des transformations et évite des erreurs dans les transformations transposées. En effet, si la transformation est correctement réalisée, alors le vecteur  $G$  est colinéaire à l'axe B du repère  
25 ABC.

La deuxième étape 3 est l'étape de mesure du champ d'un vecteur de luminance vu par un observateur particulier dans l'espace Euclidien précédemment défini.

30 Pour mesurer la direction de luminance relative à un observateur, on utilise l'espace ABC orthonormé généré au cours de la première étape 2 précédente.

Autour d'un point dans l'espace couleur ABC, la luminance est définie comme la direction issue de ce point pour laquelle l'intensité lumineuse change sans changer la teinte ou la saturation de la couleur du point  
35 vu par l'observateur.

Pour cette deuxième étape 3, l'expérience dite du « minimum motion photometry » est mise en œuvre afin de mesurer la direction de luminance relative à l'observateur autour d'un point. Le principe de l'expérience

5 du « minimum motion photometry » est en partie décrit par Anstis, S. M.,  
& Cavanagh dans « *A minimum motion technique for judging equilumi-*  
*nance. Colour vision: Physiology and psychophysics, 155-166* » avec un  
espace de représentation du stimulus indéfini. L'expérience du « minimum  
10 motion photometry » selon l'invention consiste à présenter à l'observateur  
un stimulus tel que représenté sur les figures 9b et 10 dans un espace  
couleur Euclidien orthogonal ABC. Le stimulus du « minimum motion pho-  
tometry » permet de comparer une luminance relative entre deux points  
en couleurs. Si l'un des points est plus lumineux qu'un autre, un mouve-  
ment du stimulus sera observé par l'individu ou observateur. Si le rapport  
15 de luminance est inversé alors la direction du mouvement perçu sera éga-  
lement inversée. On peut alors chercher quels points tests ont la même  
luminance qu'un point donné de référence. L'ensemble de ces points for-  
ment une surface d'équiluminance autour du point de référence. On peut  
considérer la surface d'équiluminance comme un plan, si les points de tests  
20 sont proches du point de référence. La direction de luminance est donc un  
vecteur orthogonal à ce plan d'équiluminance issu du point de référence.

Si l'on considère un point  $p$  dans l'espace ABC et le vecteur de lu-  
minance  $V(\lambda)$  défini selon la norme CIE-2006 dans l'espace ABC, alors les  
coordonnées du vecteur de luminance  $V(\lambda)$  sont données par :

$$25 \quad V_{abc} = N^T V(\lambda) \quad (1039)$$

Appelons  $v$  le vecteur normalisé à un de  $V_{abc}$  alors  $v = V_{abc}/\|V_{abc}\|$ .  
Ensuite, on construit un plan P1 passant par le point  $p$  et dont un des  
vecteurs directeur est  $v$ . Ce plan est utilisé pour définir le stimulus du « mi-  
nimum motion ». Pour ce faire, on définit également un repère  $(p, i, j)$  dans  
30 le plan P1.

Soit P1 le plan qui passe par le point  $p$ , de vecteurs directeurs  $v$  et  
[1 0 0] dans l'espace ABC. Le vecteur normal  $n$  au plan P1 est défini par :

$$n = v \wedge [1 \ 0 \ 0]^T; \quad n = n/\|n\| \quad (1040)$$

On peut ensuite définir deux vecteurs  $i$  et  $j$  unitaires qui sont or-  
thogonaux et dont la somme est égale à  $v$ . Ces vecteurs sont obtenus en  
35 faisant tourner le vecteur  $v$  autour de l'axe porté par le vecteur normal  $n$   
au plan P1 d'un angle de plus ou moins  $\pi/4$ . Une rotation d'angle  $\alpha$  autour  
du vecteur  $n$  est donnée par :

$$5 \quad Rot_n(\alpha) = \begin{bmatrix} (1-c)n_1^2 + c & (1-c)n_1n_2 - n_3s & (1-c)n_1n_3 + n_2s \\ (1-c)n_1n_2 + n_3s & (1-c)n_2^2 & (1-c)n_2n_3 - n_1s \\ (1-c)n_1n_3 - n_2s & (1-c)n_3n_2 + n_1s & (1-c)n_3^2 \end{bmatrix} \quad (1041)$$

avec :  $c = \cos(\alpha)$  ;  $s = \sin(\alpha)$  ;  $n = [n_1 \ n_2 \ n_3]^T$ .

On obtient donc :

$$i = Rot_n(-\pi/4)v \text{ et } j = Rot_n(\pi/4)v \quad (1042)$$

10 La figure 9a représente dans le repère ABC, le plan P1 de vecteurs directeurs  $v$  et  $[1 \ 0 \ 0]$ , le repère  $(p, i, j)$  tel que  $i + j = v$ , ainsi que les composantes  $R, G, Bl$  et le vecteur de luminance  $V(\lambda)$ .

Dans le plan P1 muni du repère  $(p, i, j)$ , on définit le stimulus du « minimum motion » par :

$$15 \quad S(x, t) = \begin{aligned} & j(m \sin \theta_L \sin 2\pi f_x x \sin 2\pi f_t t - dr \cos \theta_C \cos 2\pi f_x x \cos 2\pi f_t t) \\ & + i(m \cos \theta_L \sin 2\pi f_x x \sin 2\pi f_t t + dr \sin \theta_C \cos 2\pi f_x x \cos 2\pi f_t t) \end{aligned} \quad (1043)$$

15

Les paramètres du stimulus sont représentés sur la figure 9b dans le repère  $(p, i, j)$ . Un stimulus est une succession de trames de couleurs affichées sur un écran. Pour l'exemple représenté sur la figure 9b, on utilise un stimulus à quatre trames. Les longueurs  $m$  et  $r$  représentent des contrastes des trames  $t = 1$  avec  $t = 3$  et  $t = 2$  avec  $t = 4$ . On fixe  $\theta_L = \theta_C = \pi/4$  de manière à ce que les couleurs dans les trames soient orthogonales. Il est aussi possible de modifier ces angles pour mesurer le « minimum motion » au lieu de faire tourner le repère  $(p, i, j)$ . Cependant cette dernière méthode donne des résultats moins satisfaisants.

25

$x = 1..X$  et  $t = 1..T$  définissent une étendue spatiale et temporelle des trames, avec  $X$  un nombre total de points spatiaux du stimulus et  $T$  un nombre total de trames.  $f_x = 1/(Xn_{bars})$  définit une fréquence spatiale du stimulus et  $f_t = 1/T$  une fréquence temporelle du stimulus. On peut utiliser par exemple  $n_{bars} = 4$  et  $T = 4$ , ce qui signifie que le stimulus possède quatre périodes spatiales et quatre périodes temporelles. Il est également possible d'étudier la modification du champ de vecteurs avec la fréquence spatiale ou temporelle.

30

Le paramètre  $d = \{-1,1\}$  permet d'inverser la direction du mouvement perçu, toutes les autres valeurs des paramètres de l'équation (1043) étant égales par ailleurs. En effet, ce paramètre peut être vu comme une inversion

35

5 des trames  $t = 1$  et  $t = 3$  dans la séquence des trames. On utilise le paramètre  $d$  pour éviter que l'observateur puisse utiliser l'apparence des couleurs dans les trames pour en déduire le mouvement. Ce paramètre  $d$  est choisi de manière aléatoirement au cours des présentations du stimulus à l'observateur afin de changer aléatoirement la direction du mouvement  
10 perçu. Le paramètre  $d$  ainsi choisi empêche donc bien l'observateur d'utiliser l'apparence de l'image pour déterminer le mouvement perçu.

Par exemple, le paramètre  $d$  permet avantageusement d'éviter qu'un stimulus verdâtre n'entraîne une perception du mouvement toujours vers la gauche alors qu'un stimulus rougeâtre entraîne une perception du mouvement toujours vers la droite.  
15

Le stimulus est spatialement construit tel que représenté sur la figure 10. Le principe du stimulus est de déphaser les trames de manière à ce que les trames  $t = 1$  et  $t = 3$  ainsi que  $t = 2$  et  $t = 4$  soient respectivement en opposition de phase. Les trames successives ( $t = 1 ; t = 2$ ), ( $t = 2 ; t = 3$ ), ( $t = 3 ; t = 4$ ) et ( $t = 4 ; t = 1$ ) sont quant à elles décalées d'un quart de cycle.  
20

Les diagrammes de la colonne droite B10 de la figure 10 représentent le profil spatial des valeurs digitales DV : rouge, DV/R ; vert, DV/G et bleu, DV/Bl pour les différentes trames. Pour les trames  $t = 1$  et  $t = 3$ , les couleurs *RGBI* sont en phase alors que pour les trames  $t = 2$  et  $t = 4$  elles sont en oppositions de phase. Les points jaune clair 10, jaune foncé 11, rouge 12 et vert 13 représentant les valeurs digitales DV des points correspondant dans l'espace ABC de la figure 9a.  
25

30 Les images de gauche de la colonne A10 de la figure 10 représentent les images affichées pour chaque trame.

Le stimulus est composé d'une séquence temporelle de quatre trames de modulations spatiales sinusoïdales telles que représentées sur la figure 10. Cette séquence produit un mouvement vers la droite, respectivement  
35 vers la gauche, si le point pour  $t = 2$  apparaît plus lumineux pour l'observateur que le point pour  $t = 4$  ou respectivement moins lumineux. Les points à  $t = 1$  et  $t = 3$  sont des trames qui induisent le mouvement, elles sont composées de la somme vectorielle de  $i$  et  $j$ , ajoutée ou retranchée au point  $p$ .

5 Pour  $d = 1$  le principe de la mesure est que si la sensation lumineuse du vert pour un observateur est supérieure à la sensation lumineuse du rouge, il apparaît à l'observateur un mouvement vers la gauche, car le vert de la trame  $t = 2$  va suivre le jaune plus lumineux de la trame  $t = 3$  et suivre le vert de la trame  $t = 4$ , etc. L'observateur a ainsi une sensation de mouvement vers la gauche. Si le rouge est plus lumineux que le vert pour l'observateur alors le mouvement est perçu vers la droite. Pour  $d = -1$  les mouvements sont inversés.

15 On détermine le mouvement minimum en faisant tourner le repère à partir d'une position initiale  $(p, i_{ini}, j_{ini})$  vers une position  $(p, i_{obs}, j_{obs})$  pour laquelle le mouvement du stimulus est minimal pour l'observateur. L'angle de la rotation du repère est donné par  $\theta_{obs}$  comme représenté sur la figure 11a.

20 Dans le plan P1, on utilise une procédure adaptative pour estimer le seuil  $\theta_{obs}$  telle que représentée sur les figures 12a et 12b. La procédure adaptative fonctionne de la manière suivante. On choisit des valeurs aléatoires de  $\theta_{obs}$  dans un intervalle  $[-0.2; 0.2]$ , ce qui permet de définir le repère  $(p, i, j)$  à partir du repère  $(p, i_{ini}, j_{ini})$  tel que représenté sur la figure 11a. Le stimulus est ensuite affiché dans le nouveau repère  $(p, i, j)$  et on demande à l'observateur de donner la direction du mouvement qu'il perçoit. Suivant la valeur d'un paramètre  $d \in \{-1, +1\}$  et de la direction du mouvement perçu les réponses de l'observateur sont affichées soit en rouge 21 à l'ordonnée 1 de la figure 12b, soit en vert 22 à l'ordonnée 0 sur la figure 12b. Au bout de dix essais 20 on réalise une estimation non linéaire au moindre carré qui donne une fonction psychométrique 23 :

$$f(\theta) = 1 / \left( 1 + e^{-\frac{(\theta - \theta_{obs})}{\sigma}} \right) \quad (1044)$$

35 La fonction psychométrique 23 est utilisée pour optimiser les tirages des essais suivants 20 dans l'objectif d'estimer le plus rapidement possible un seuil 24 de mouvement minimal. Dans le cas représenté, trente essais sont suffisants pour une bonne estimation du seuil.

Sur la figure 12a,  $v_n = v_{obs\ init} = v$  le vecteur normalisé à un de  $V_{abc}$  ;  $v_{obs\ final}$  vaut  $i + j$  au seuil de mouvement minimal.

5

Une fois que l'on a estimé la direction du mouvement minimal dans le plan P1, on construit un plan P2, tel que représenté sur la figure 11b, colinéaire à la direction du mouvement minimal dans P1 et colinéaire au vecteur  $[0 \ 0 \ 1]$ . Dans le plan P2 on utilise le même protocole pour déterminer  
10 la direction du mouvement minimal. Dans le plan P2, les couleurs du stimulus seront bleues et jaunes au lieu de rouges et vertes.

Lorsque l'on a réalisé la mesure du mouvement minimal perçu dans P1 et dans P2, on peut reconstruire un vecteur de luminance  $V$  tridimensionnel issu du point  $p$  pour un observateur donné.  
15

L'étape suivante de la méthode selon l'invention est la troisième étape 4 de construction d'un espace hyperbolique représentatif de l'espace de vision en couleur de l'observateur faisant face à l'afficheur.

20 On peut par exemple utiliser la procédure précédente pour associer une luminance  $V$ , vue par un observateur, à plusieurs points  $p$  de l'afficheur dans l'espace ABC. Pour cela, on pourra choisir plusieurs points dans l'espace ABC. Ces points peuvent être choisis sur une sphère de rayon  $k$ . Par exemple, on peut choisir  $N'$  points répartis uniformément sur la surface de  
25 la sphère de rayon  $k$ . Appelons  $P_k$  la matrice de ces points. A chacun de ces points on associe une mesure de la direction de luminance. Appelons  $V_k$  la matrice contenant l'ensemble des vecteurs de direction de luminance. Les matrices  $P_k$  et  $V_k$  sont alors de taille  $3 \times N'$  pour un rayon de mesure  $k$  de la sphère. On peut multiplier les mesures pour plusieurs rayons de sphères,  
30 par exemple, de  $K$  différents rayons. Les figures 13a, 13b, représentent un ensemble de ces mesures pour  $N' = 15$  points sur une sphère de rayon un et quatre dans ABC. Sur les figures 13a, 13b, les points représentent les coordonnées des points  $p$  et les flèches, les directions de  $V$ . La figure 13b montre les mesures pour  $N' = 15$  points sur la sphère de rayon quatre. On  
35 peut observer clairement que les vecteurs partant des points  $p$  et de direction  $V$  forment un champ de vecteurs convexes puisque les flèches semblent pointer vers une même direction sur les figures 13a et 13b.

5 Le champ de vecteurs convexes peut être modélisé par une équation du type :

$$V_k(x) = A_k x + x_{0k} \quad (1045)$$

avec :

$$A_k = V_1 P_1 (P_1 P_1^T)^{-1}$$
$$x_{0k} = \bar{V} - A_k \bar{P}$$

où ici  $x$  est une coordonnée d'un point dans l'espace ABC et  $x_0$  une coordonnée de l'origine du champ de vecteurs de luminance  $V_k(x)$ .  $V_1 = V_k - \bar{V}$  et  $P_1 = P_k - \bar{P}$  où  $\bar{P} = E_k\{P_k\}$ ,  $\bar{V} = E_k\{V_k\}$  sont les moyennes des matrices  $V_k$  et  $P_k$  le long de  $N'$  points,  $E_k$  représentant l'espérance. La matrice  $A_k$  et le vecteur  $x_{0k}$  sont des paramètres du champ de vecteurs pour un ensemble de mesures sur une sphère de rayon  $k$  dans ABC. En choisissant d'autres points de mesures, on obtient des paramètres différents : même si ces autres points produisent un autre champ de vecteurs, ce dernier est cependant proche du premier champ de vecteurs tel que représenté sur la figure 13a. De même, si l'on regarde l'évolution des paramètres avec le rayon de la sphère, leur évolution est faible. Il peut être intéressant de suivre la nature propre de la vision de l'observateur en fonction des niveaux de lumière tout en gardant un paramètre  $k$  fixé pour reproduire, avec un modèle affine du champ de vecteurs  $V_k$  ou modèle de l'observateur : un ensemble de mesures pour plusieurs rayons de sphère différents. Il est possible d'inclure dans le modèle affine du champ de vecteurs  $V_k$  des variations du modèle selon les fréquences spatiales  $f_x$  et temporelles du stimulus  $f_t$ , l'excentricité  $e$  du stimulus sur la rétine, l'afficheur  $E$ , l'observateur  $O$ . Ainsi les paramètres du champ de vecteurs de luminance mesuré  $V_k$ , pour l'observateur regardant l'afficheur, avec un stimulus d'excentricité, de fréquences spatiales et temporelles peuvent s'écrire :  $A_\mu$  et  $x_{0\mu}$  avec  $\mu = (k, f_x, f_t, e, E, O)$  l'ensemble des paramètres. Le paramètre de l'afficheur  $E$  est un jeu de primaire Euclidienne ABC de l'afficheur, un jeu de primaire Euclidienne ABC regroupe les fonctions spectrales ABC qui caractérisent un écran particulier. Pour un observateur donné sur un afficheur donné, à partir des points de mesure réalisés en faisant varier tous les autres paramètres, il est possible de prédire, par interpolation, le champ de vecteurs pour toute valeur à l'intérieur de ces paramètres. Autrement dit, si l'on fixe le stimulus par exemple

5 en fréquence spatiale, temporelle, étendue du stimulus, on obtient un premier champ de vecteurs. Mais si l'on change ces paramètres, on obtient un deuxième champ de vecteurs qui peut différer du premier champ de vecteurs. Il est donc possible de paramétrer le champ de vecteurs en fonction des conditions de mesures et d'interpoler le champ de vecteurs entre ces  
10 mesures.

Dans toute la suite, et sauf mention contraire, l'observateur, l'afficheur, l'excentricité et les fréquences sont données. Seul le rayon de la sphère de mesure est variable.

15

Il est possible de calculer une surface de luminance constante à partir du champ de vecteurs. Cette surface est donnée par

$$x^T \cdot V_k(x) = x^T A_k x + x^T x_0 = k \quad (1046)$$

où le produit scalaire est donné par le produit scalaire Euclidien dans  
20 l'espace ABC de l'afficheur  $E$ . Pour l'exemple la figure 13c représente des surfaces de luminance constante 30, 31 correspondant respectivement à  $k = 1$  et  $k = 4$ , pour un premier observateur dans le repère ABC et la figure 13d représente des surfaces de luminance constante 32, 33 pour  $k = 1$  et  $k = 4$  pour un deuxième observateur dans le repère ABC.

25

Les mesures montrent que les champs de vecteurs sont identiques quel que soit le rayon de la sphère sur laquelle sont placés les points autour desquels le champ de vecteurs est mesuré. C'est-à-dire que  $A_k$  peut s'écrire  $A_k = A/k$ . Il s'ensuit que la relation (1046) devient :

30

$$x^T A x + k x^T x_0 = k^2 \quad (1047)$$

Que l'on peut également écrire :

$$z^T J z = k^2 \quad (1048)$$

Avec :

$$J = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1049)$$

35

$$z = T^{-1}(x + t_0) = \frac{1}{\rho} \sqrt{|S|} U^T \left( x + \frac{k}{2} A^{-1} x_0 \right), \quad T^{-1} = \frac{1}{\rho} \sqrt{|S|} U^T, \quad t_0 = \frac{k}{2} A^{-1} x_0 \quad (1050)$$

$$5 \quad A = U\sqrt{|S|} \mathbf{J}\sqrt{|S|}U^T \text{ et } \rho^2 = 1 + \frac{1}{4}x_0^T A^{-1}x_0 \quad (1051)$$

Où  $U$  et  $S$  sont respectivement la matrice des vecteurs et des valeurs propres de  $A$ .

La transformation inverse est donnée par :

$$x = Tz - t_0 = \rho U \left( \sqrt{|S|} \right)^{-1} x - \frac{k}{2} A^{-1} x_0 \quad (1052)$$

10 Les paramètres du champ de vecteurs permettent de définir complètement la transformation de l'espace ABC de variable  $x$  à un espace hyperbolique de variable  $z$ , composée d'hyperboloïdes en deux dimensions empi-  
lées infiniment les unes sur les autres.

Ainsi, si l'on définit l'hyperboloïde dans l'espace hyperbolique de va-  
15 riable  $z$  par l'équation :

$$z^T \mathbf{J}z = 1, \text{ soit } z = \begin{bmatrix} \sinh(t) \cos(\theta) \\ \sinh(t) \sin(\theta) \\ \cosh(t) \end{bmatrix} \quad (1053)$$

On peut représenter cet hyperboloïde dans l'espace de  $x$  par la rela-  
tion (1052). Ainsi  $x$  représente les coordonnées dans l'espace ABC de l'hy-  
perboloïde définie dans l'espace de  $z$ .

20

La Figure 14 présente un exemple de représentation conjointe de l'es-  
pace de l'écran et de l'espace de l'observateur dans un espace commun,  
ABC. L'écran est matérialisé par un cube 40 de couleurs que l'écran peut  
produire avec des phosphores matérialisés par les vecteurs R, G et B et  
25 l'origine  $0_x$ . L'observateur est matérialisé par l'hyperbole 42 de centre 45 et  
d'axes  $z_1, z_2, z_3$ , dans le repère de centre  $0_z$ .

En prenant l'équation (1048) et en remplaçant  $z$  par son expression  
(1050) en fonction de  $x$ , on peut obtenir une représentation des hyperbo-  
loïdes de rayon  $k$  dans l'espace ABC.

$$30 \quad z^T \mathbf{J}z = k^2, \quad z = T^{-1}(x + t_0)$$

$$(x + t_0)^T (T^{-1})^T \mathbf{J} T^{-1} (x + t_0) = k^2 \quad (1054)$$

Si l'on pose,

$$X = x/k, \quad X_0 = t_0/k \text{ et } R = (T^{-1})^T \mathbf{J} T^{-1} \quad (1055)$$

on a :

$$35 \quad (X + X_0)^T R (X + X_0) = 1 \quad (1056)$$

5 Cette équation représente pour  $X + X0$  dans le repère ABC, l'hyperboloïde de rayon  $k = 1$  suivant la métrique  $R$ .

C'est-à-dire que pour  $X = x/k$ , la métrique est totalement représentée par une hyperboloïde de rayon  $k = 1$  et la métrique produite par  $R$  et  $X0$  dans ABC. Réciproquement il suffit de projeter  $x$  sur l'hyperboloïde de rayon  $k = 1$  suivant  $x = kX$ , pour obtenir le point  $X$  correspondant à  $x$  et la valeur de  $k$ .

10 La Figure 14 représente une projection d'un premier point 41 de l'espace ABC sur un hyperboloïde 42 de rayon un en un deuxième point 43 suivant la direction  $X = x/k$  représentées par une droite 44.

Il est donc possible de transformer n'importe quel point de l'espace ABC dans l'espace de l'hyperboloïde de rayon 1. Il faut d'abord projeter le point  $x$  sur l'hyperboloïde de rayon 1 pour obtenir  $X$ . Ensuite  $X$  suit une métrique donnée par l'équation (1056).

15 Autrement dit, on peut associer à l'espace ABC, la métrique de l'observateur qui est une métrique hyperbolique dans l'espace  $z$  et qui s'exprime par  $R$  et  $X0$  dans l'espace ABC. On peut ainsi connaître la position, de tous les points de l'écran dans l'espace hyperbolique de l'observateur.

Chaque point  $x = [x_a, x_b, x_c]^T$  de l'espace de l'écran ABC peut donc être transformé en coordonnées liées à la métrique de l'observateur suivant les paramètres  $(k, t, \theta)$ .

$$z = \begin{bmatrix} k \sinh(t) \cos(\theta) \\ k \sinh(t) \sin(\theta) \\ k \cosh(t) \end{bmatrix} \quad (1057)$$

Avec

$$k = \sqrt{(x + X0)^T R (x + X0)}, \quad (1058)$$

$$Z = \frac{z}{k} = T^{-1} \left( \frac{x}{k} + X0 \right) = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix}, \quad (1059)$$

30  $t = \operatorname{arccosh} \left( \frac{z_3}{k} \right), \theta = \arctan \left( \frac{z_2}{z_1} \right). \quad (1060)$

Une correction d'une image pour un observateur peut par exemple, consister à modifier les valeurs de  $k$ . Par exemple, si l'on force  $k = 1$  pour l'ensemble des points d'une image, alors l'observateur aura tout le loisir de contempler les couleurs de l'image mais l'ensemble de son système visuel sera en mode d'adaptation constant ce qui devrait réduire la fatigue visuelle.

35

5

En résumé, la conversion d'une image numérique pour qu'elle corresponde à un observateur particulier est donc donnée par l'ensemble des opérations suivantes :

- 10 - La construction d'un espace hyperbolique de l'observateur dans l'espace ABC de l'écran. Cet espace étant donné par  $T$  et  $t_0$  selon l'équation (1050).
- La conversion des points  $x$  de l'image dans l'espace ABC en points  $z$ , ladite conversion étant paramétrée par  $(k, t, \theta)$  suivant les équations (1058),(1059),(1060).
- 15 - La modification du paramètre  $k$ , soit en le fixant à une constante par exemple pour une adaptation à un niveau de luminance constant de l'observateur, ou en réduisant sa variance, par exemple pour une diminution de la différence d'adaptation entre les différentes régions de l'image.

20 À titre d'exemple, un modèle de conversion d'un système composé d'une caméra et d'un afficheur est décrit. Ce modèle permet de reproduire le plus fidèlement possible la radiance spectrale d'une scène, acquise par la caméra, et affichée par l'afficheur. La figure 15 représente un schéma de conversion entre l'espace de radiance de la scène, l'espace de gain de la

25 caméra  $(h_R, h_G, h_B)$ , et l'espace de gain de l'afficheur  $(g_R, g_G, g_B)$ . Une radiance spectrale  $m$  est acquise par une caméra de sensibilités spectrales  $F_1, F_2, F_3$  qui sont également des vecteurs dans l'espace des lumières RGB. L'information acquise par la caméra peut être représentée comme un gain d'une fonction spectrale d'origine  $f_0$  et de gain  $K'$ .

30 Soit  $F = [F_1 F_2 F_3]$  une matrice de taille  $n_\lambda \times 3$ , qui contient les fonctions de sensibilité spectrale de la caméra. Ces fonctions sont composées de la fonction spectrale du chemin optique de la caméra, de la transmission spectrale optique des filtres de couleurs, de la conversion photoélectron par le système électronique. Le chemin optique de la caméra peut être composé

35 de lentilles, microlentilles, filtre biréfringent, filtre de coupure infrarouge.

Les fonctions de sensibilité spectrale de la caméra forment des primaires d'analyse de la radiance spectrale de la scène et on peut reporter le gain de ces primaires dans un espace de gain. On suppose que la caméra

5 est réglée de telle manière que le minimum des radiances de la scène corresponde au gain zéro et que le maximum des radiances de la scène corresponde au gain un. Ce réglage peut être assuré par une modification du niveau de noir  $f_0$  et du temps d'intégration  $K''$  de la caméra. Le modèle de la caméra peut être écrit comme une homographie entre les coordonnées homogènes de la radiance et les coordonnées homogènes du gain.

10 Soit  $z_0 = [z(\lambda) \ 1]^T$  la coordonnée homogène d'une radiance spectrale de la scène  $z(\lambda)$ . Les gains  $g_0 = [g_{F1}, g_{F2}, g_{F3}, s]^T$  peuvent-être calculés comme suit :

$$g_0 = H_{cam} z_0 \text{ avec } H_{cam} = \left[ \begin{array}{c|c} F & -f_0 \\ \hline 0 \ 0 \ 0 & K \end{array} \right],$$

$$15 \quad H_{cam}^{-1} = \left[ \begin{array}{c|c} (F^T F)^{-1} F^T & (F^T F)^{-1} F^T f_0 \\ \hline 0 \ .. \ 0 & 1/K \end{array} \right], \quad (1063)$$

$$g = [g_{F1}, g_{F2}, g_{F3}] = [g_{F1}, g_{F2}, g_{F3}, 1] = g_0/s$$

De la même manière, on peut définir un modèle de l'afficheur comme une homographie  $H_{dis}$  à partir de l'équation (1003) :

$$H_{dis} = \left[ \begin{array}{c|c} M & m_0 \\ \hline 0 \ 0 \ 0 & 1 \end{array} \right], H_{dis}^{-1} = \left[ \begin{array}{c|c} (M^T M)^{-1} M^T & -(M^T M)^{-1} M^T m_0 \\ \hline 0 \ .. \ 0 & 1 \end{array} \right] \quad (1064)$$

20 L'homographie de conversion  $H_{conv}$  entre les gains de la caméra et les gains de l'afficheur est donnée par :

$$H_{conv} = H_{cam}^{-1} H_{dis}, \text{ et } H_{conv}^{-1} = H_{dis}^{-1} H_{cam} \quad (1065)$$

25 En disposant d'un système de conversion entre les données numériques d'une caméra et celles d'un afficheur, il est possible de convertir n'importe quelle donnée d'un espace vers un autre, qu'il soit de type couleur, ABC ou RGB camera ou RGB afficheur, ou encore de type spectral comme une radiance spectrale dans la base des longueurs d'ondes monochromatiques.

30 Le modèle de l'observateur est considéré comme une sensibilité spectrale, dans un espace hyperbolique. C'est-à-dire que l'espace de l'observateur est un espace affine convexe de dimensions trois muni d'une métrique hyperbolique  $\mathbb{H}^3$  que l'on peut plonger dans un espace Euclidien de dimension quatre :  $\mathbb{R}^4$ .

5 À chaque observateur correspond un changement de variable entre l'espace de mesure ABC et l'espace hyperbolique de l'observateur  $y = [y_1, y_2, y_3]$ , ce qui explique les variations de perception entre les individus.

Définissons un espace  $y$  à l'aide de l'espace ABC dans lequel les mesures de l'observateur sont réalisées. Le changement de variable adéquat  
10 pour plonger la surface de luminance constante dans l'espace hyperbolique  $\mathbb{H}^3$  est à déterminer par la suite.

L'espace hyperbolique  $\mathbb{H}^3$  dispose d'une métrique qui peut être transformée en métrique Euclidienne en considérant une dimension supplémentaire,  $\mathbb{R}^4$ . Le modèle de l'hyperboloïde donne les projections  $\varphi$  et sa projection  
15 inverse comme transformation de l'espace  $\mathbb{H}^3$  en  $\mathbb{R}^4$ .

Le modèle général de transformation entre l'afficheur et l'observateur est représenté sur la figure 16.

La figure 16 représente l'espace de l'observateur 30 face à l'espace des lumières produites par l'afficheur 31. À partir de l'espace de l'afficheur 31, on produit l'espace ABC par orthogonalisation. Dans l'espace ABC, on mesure les surfaces de luminance constantes pour l'observateur, ce qui permet de déterminer le changement de variable  $f$  de l'espace ABC vers l'espace  $\mathbb{H}^3$ . Ensuite, la métrique est imposée par  $\mathbb{R}^4$ , et l'on projette indifféremment  $y$  sur  $z$  ou  $z$  sur  $y$  à travers la projection  $\varphi$  et son inverse.  
25

La transformation entre  $\mathbb{R}^4$  et  $\mathbb{H}^3$  permet d'expliquer la formation d'une surface à luminance constante dans l'espace hyperbolique  $\mathbb{H}^3$ . Par exemple, une déviation dans le sens de luminance dans l'espace ABC, correspond à une certaine déviation dans l'espace hyperbolique  $\mathbb{H}^3$  qui sera  
30 déterminé par un déplacement uniforme sur les coordonnées  $z_1, z_2$  et  $z_3$  de l'espace  $\mathbb{R}^4$ . On peut alors écrire :

$$dx = g(dz) \text{ avec } dz = \begin{bmatrix} d \\ d \\ d \\ \sqrt{(z_1 + d)^2 + (z_2 + d)^2 + (z_3 + d)^2 + 1} \end{bmatrix} \quad (1066)$$

et  $g(dz) = F\mathfrak{S}dz$  où  $F = \left[ \frac{\partial f_j(x_i)}{\partial x_i} \right]$ ,  $\mathfrak{S} = \left[ \frac{\partial \varphi(y_i)}{\partial y_i} \right]$  sont les Jacobiennes des transformations  $f$  et  $\varphi$ .  $dx$  décrit alors un sous-espace vectoriel que l'on  
35 peut apparenter aux mesures de la surface de luminance constante dans l'espace ABC.

5

Les différents modes de réalisation de la présente invention comprennent diverses étapes. Ces étapes peuvent être mises en œuvre par des instructions d'une machine exécutable au moyen d'un microprocesseur par exemple.

10

Alternativement, ces étapes peuvent être réalisées par des circuits intégrés spécifiques comprenant une logique câblée pour exécuter les étapes, ou par toute combinaison de composants programmables et de composants personnalisés.

15

La présente invention peut également être fournie sous forme d'un produit programme d'ordinateur qui peut comprendre un support mémoire informatique non-transitoire contenant des instructions exécutables sur une machine informatique, ces instructions pouvant être utilisées pour programmer un ordinateur (ou tout autre dispositif électronique) pour exécuter les procédés.

20

La présente invention présente différents avantages selon ses domaines d'application :

25

- l'invention permet de définir des règles de calcul pour évaluer la qualité des images et des modèles d'apparence selon une perception humaine de ces derniers ;
- avantageusement, l'invention permet une amélioration de la qualité visuelle des interfaces homme-machine et une adaptabilité à plusieurs observateurs différents ;
- il est également possible d'appliquer avantageusement l'invention à des systèmes de réalité artificielle ou augmentée afin de favoriser l'imprégnation de l'observateur face à l'afficheur en utilisant un modèle de vision correspondant à l'observateur.

30

Les applications industrielles de l'invention sont extrêmement vastes. En considérant, comme il est commun, un modèle moyen d'observateur issu d'une moyenne d'observateurs d'une région donnée du monde par exemple, il est possible d'envisager des applications dans le domaine de la prédiction d'une apparence colorée dans le domaine du textile ou de la peinture.

35

5            Il est aussi possible de trouver une application dans le domaine de l'optimisation des phosphores ou des filtres colorés des systèmes d'afficheurs multimédia.

            Une autre application peut être dans le domaine de l'optimisation de d'une boucle d'acquisition et restitution de l'imagerie numérique et analogique couleur comme la photographie sur films ou la photographie numérique.  
10

            Enfin il est possible d'appliquer l'invention à la création d'avatars extraterrestres ayant des propriétés de perception dans des domaines de longueur d'onde hors du domaine électromagnétique visible par un être humain.  
15

5

## REVENDEICATIONS

1. Procédé, mis en œuvre par ordinateur (7), de construction d'un espace de couleurs propre à un observateur (8) visualisant une image en couleurs sur un dispositif d'affichage (6) connecté audit ordinateur (7), caractérisé en ce qu'il comprend au moins les étapes suivantes :

- 10 • une première étape de mesures de radiances spectrales émises par le dispositif d'affichage (6) et capté par un dispositif de mesures de radiance (9) ; les mesures de radiance spectrales étant réalisées pour plusieurs valeurs numériques DV représentant des consignes données au dispositif d'affichage (6) par une carte graphique présente dans l'ordinateur (7), lesdites consignes permettant d'afficher une image sur chaque canal de couleur du dispositif d'affichage (6),
- 15 • une deuxième étape de construction d'un modèle affine des lumières produites par le dispositif d'affichage (6) dans un espace de couleur orthogonal euclidien du dispositif d'affichage (6) à partir des mesures de radiances spectrales ; ledit modèle affine des lumières produites par le dispositif d'affichage (6) étant défini en fonction des valeurs numériques DV et des valeurs de gain du dispositif d'affichage (6) ;
- 20 • une troisième étape de mesure d'un champ de vecteurs de luminance perçu par l'observateur (8) placé devant le dispositif d'affichage (6) et soumis à un stimulus défini dans l'espace de couleur orthogonal euclidien du dispositif d'affichage (6) ; l'ordinateur (7) mettant en œuvre une méthode de type « minimum motion photometry » appliquée à l'observateur (8) auquel on présente le stimulus, et une interface étant placée entre l'ordinateur (7) et l'observateur (8) ;
- 25 • une quatrième étape de construction d'un espace hyperbolique représentant un espace de vision en couleurs propre à l'observateur (8) placé devant le dispositif d'affichage (6) à partir de champ de vecteurs de luminance mesuré ; le champ de vecteurs de luminance étant déterminé pour une pluralité de points localisés sur une sphère de rayon k ou plusieurs sphères de différents rayons dans l'espace orthogonal euclidien ; une surface de luminance constante étant déterminée à
- 30
- 35

- 5 partir du champ de vecteurs ; et cette surface de luminance constante prenant la forme d'un hyperboloïde dans un espace hyperbolique  $z$  ;
- la détermination d'une fonction de conversion qui exprime chaque point  $x = [x_a, x_b, x_c]^T$  dans l'espace de couleur orthogonal euclidien du dispositif d'affichage en des point  $z = [z_1, z_2, z_3]^T$  dans l'espace hyperbolique de l'utilisateur, le vecteur  $Z$  étant défini au travers de paramètres  $(k, t, \theta)$  tel que : tel que :
- 10

$$k = \sqrt{(x - X0)^T R (x - X0)}$$

$$z = \begin{bmatrix} k \sinh(t) \cos(\theta) \\ k \sinh(t) \sin(\theta) \\ k \cosh(t) \end{bmatrix}$$

avec  $t = \operatorname{arccosh}\left(\frac{z_3}{k}\right)$  ;  $\theta = \arctan\left(\frac{z_2}{z_1}\right)$  , et

- 15
- une compensation de l'image présentée sur le dispositif d'affichage en fixant le paramètre  $k$  à une valeur constante pour tous les points de l'image ou en réduisant la variance du paramètre  $k$ .

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la deuxième étape de construction d'un modèle affine comprend :

20

- une étape de calcul de fonctions prototypes du dispositif d'affichage (6) pour chaque canal de couleur en fonction des radiances spectrales mesurées ;
  - une étape de calcul des gains du dispositif d'affichage (6) pour chaque canal de couleur en fonction des radiances spectrales mesurées ;
  - une étape d'interpolation des gains pour chaque canal de couleur du dispositif d'affichage (6) entre les valeurs des radiances spectrales mesurées ;
  - une étape de détermination d'une fonction non-linéaire vectorielle de l'espace des valeurs numériques DV vers l'espace des gains du dispositif d'affichage (6).
- 25
- 30

3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que le calcul des fonctions prototype est réalisé par une méthode parmi :

- 35
- une utilisation des valeurs maximales des mesures de radiances sur chaque canal de couleur ;

- 5
- une décomposition de rang un en valeurs et vecteurs singuliers d'une matrice composée des valeurs des mesures de radiance spectrale pour chaque canal de couleur.

4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caracté-  
10 risé en ce que l'étape de transformation de l'espace de couleur orthogonal euclidien en un espace affine est réalisée par une méthode parmi :

- une première méthode dite par décorrélation ;
- une deuxième méthode par projection spectrale canonique ;
- une troisième méthode dite de Gram-Schmidt ;
- 15 • une quatrième méthode par décomposition en valeurs singulières.

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caracté-  
risé en ce que la première étape de mesure est mise en œuvre par un spec-  
trophotomètre (9).

20

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caracté-  
risé en ce que le paramètre  $k$  est adapté en le fixant à une valeur constante  
pour réaliser une adaptation de l'image présentée par le dispositif d'affichage  
(6) à un niveau de luminance constant pour l'observateur (8), placé devant  
25 le dispositif d'affichage (6).

7. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce que le paramètre  $k$  est  
adapté en réduisant sa variance pour diminuer l'adaptation de l'observateur  
(8) à la différence de luminance entre les différentes régions de l'image.

30

8. Dispositif de mesure d'un espace de couleurs propre à un observateur (8)  
et de correction d'images numériques en fonction de l'espace de couleurs  
propre à l'observateur (8), caractérisé en ce qu'il comprend :

- un dispositif d'affichage (6) d'une image couleur ;
- 35 • un dispositif de mesure d'une radiance spectrale émise par le dispo-  
sitif d'affichage (6) ;
- un dispositif de calcul d'un espace de couleur propre à un individu à  
partir de la radiance spectrale mesurée et de l'image couleur affichée,

5 et un procédé de correction d'images numériques, comprenant au  
moins : un processeur de calculs, un dispositif d'enregistrement et de  
stockage de données, une interface avec le dispositif de mesure et  
une interface avec le dispositif d'affichage (6), une interface avec l'ob-  
servateur (8), le procédé de correction d'images numériques étant  
10 mis en œuvre selon l'une quelconque des revendications 1 à 7.

9. Produit programme d'ordinateur comprenant des instructions qui, lorsque  
le programme est exécuté par un ordinateur (7), conduisent celui-ci à mettre  
en œuvre les étapes du procédé de correction d'images selon l'une quel-  
15 conque des revendications 1 à 7.

10. Support d'enregistrement lisible par ordinateur comprenant des instruc-  
tions qui, lorsqu'elles sont exécutées par un ordinateur, conduisent celui-ci  
à mettre en œuvre les étapes du procédé de correction d'images selon l'une  
20 quelconque des revendications 1 à 7.

1/8

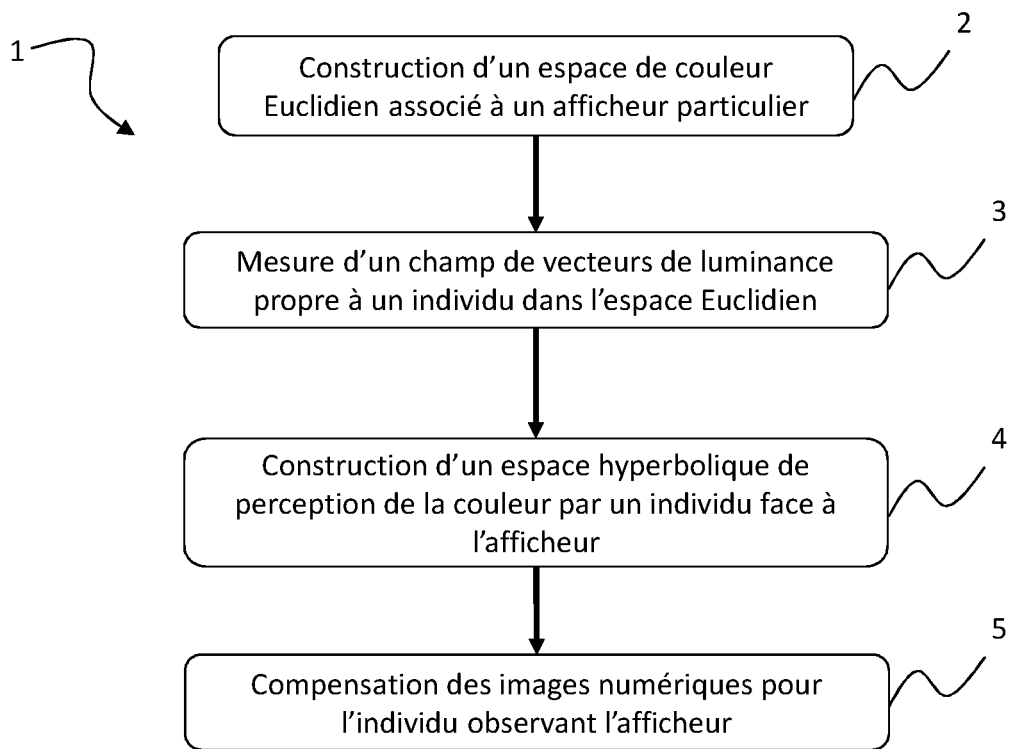


FIG 1

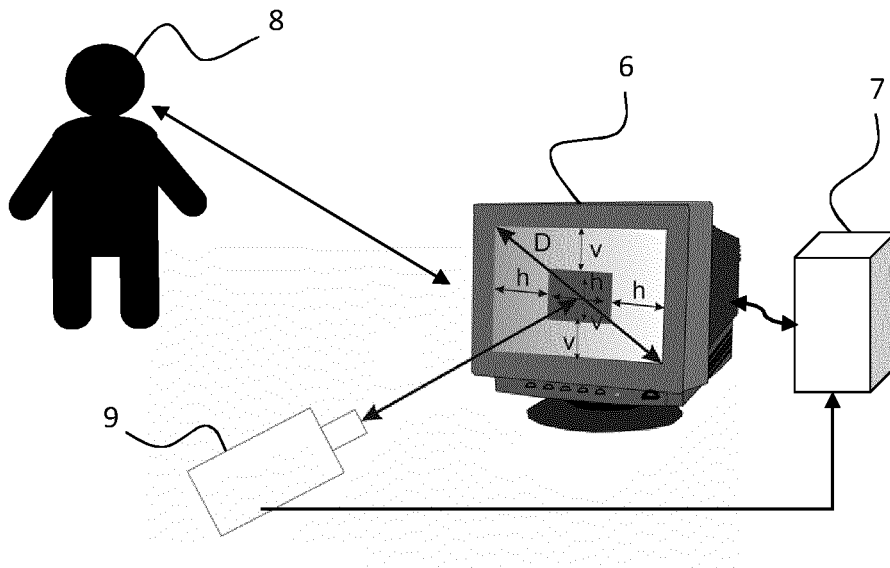


FIG 2

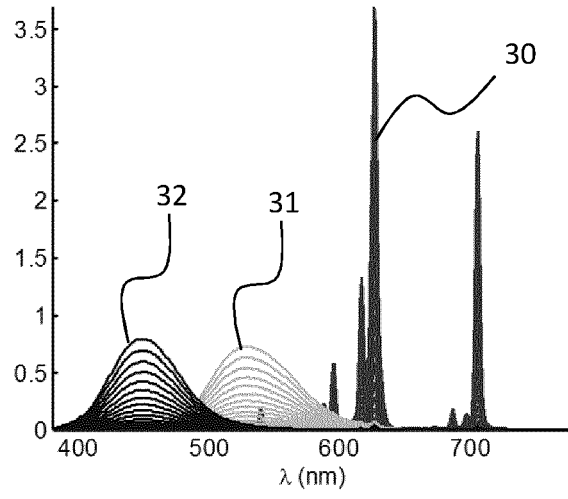


FIG 3

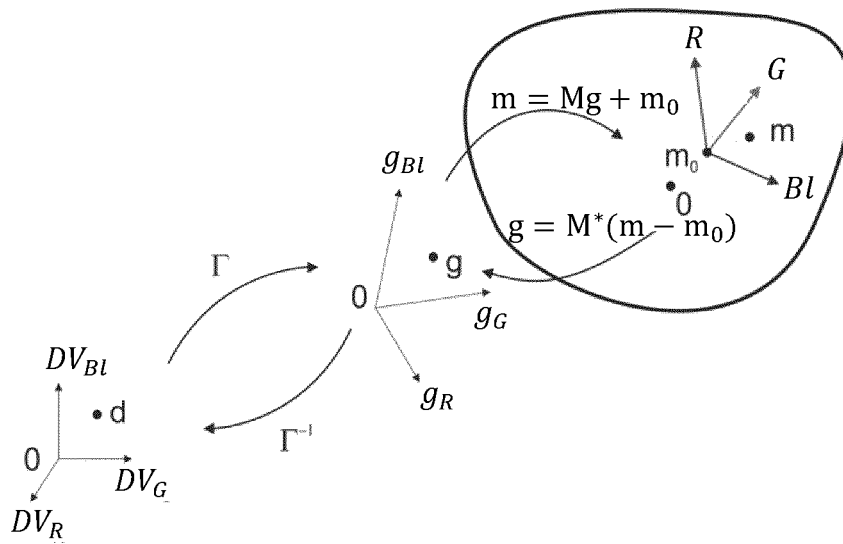


FIG 4

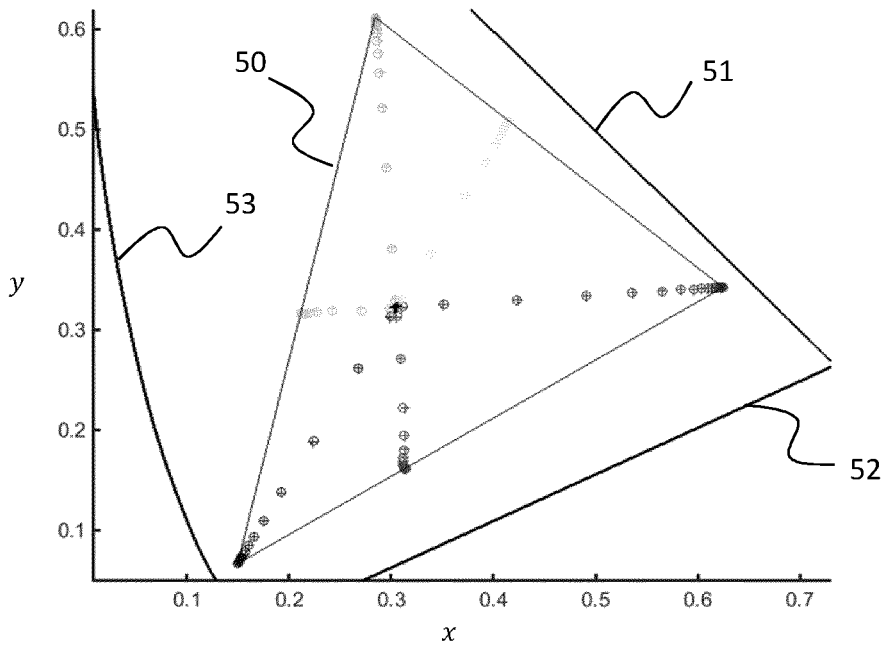


FIG 5

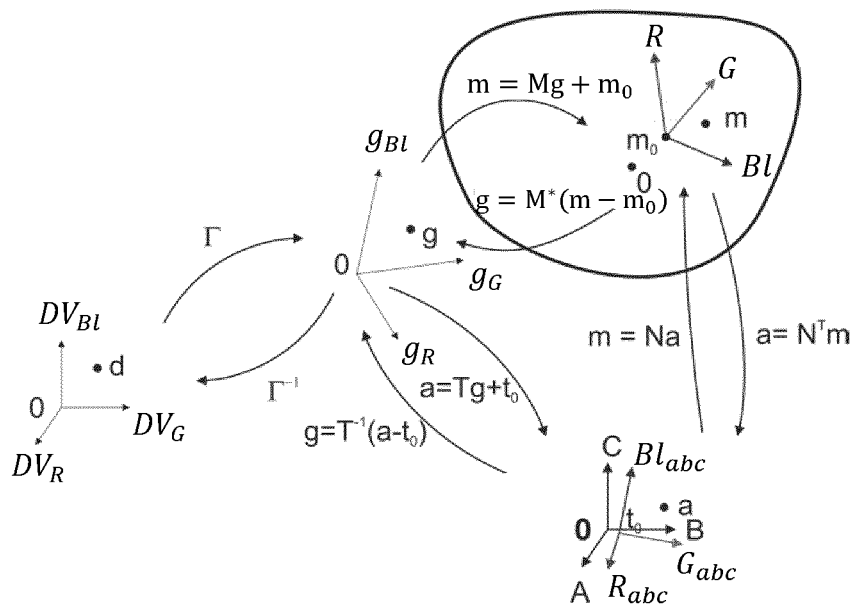


FIG 6

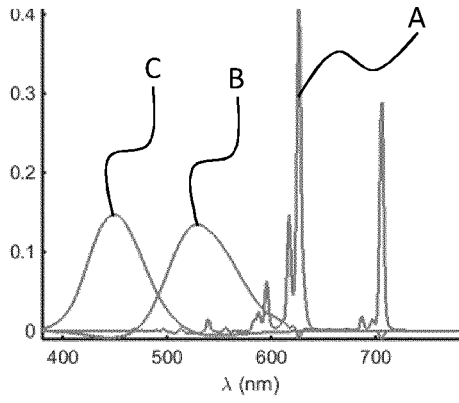


FIG 7a

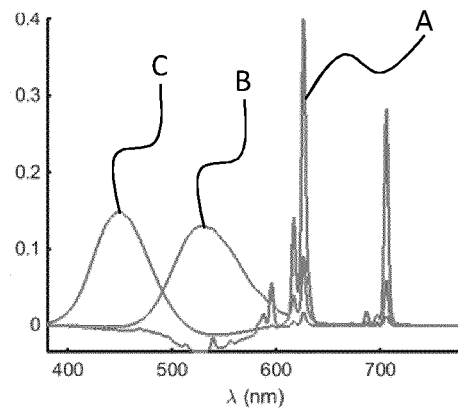


FIG 7b

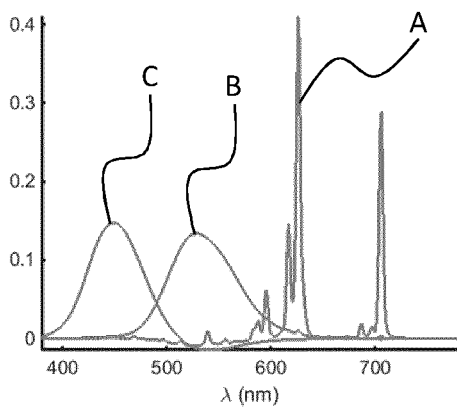


FIG 7c

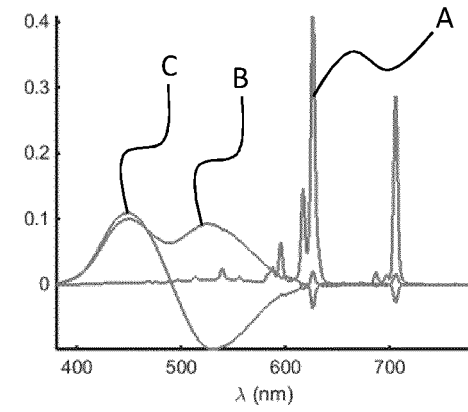


FIG 7d

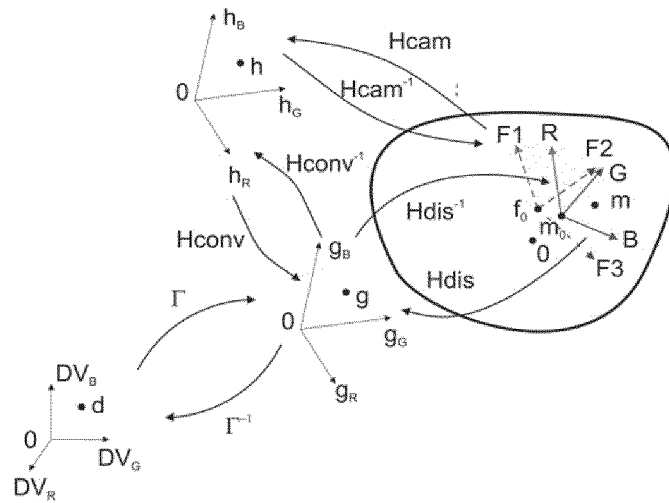


FIG 15

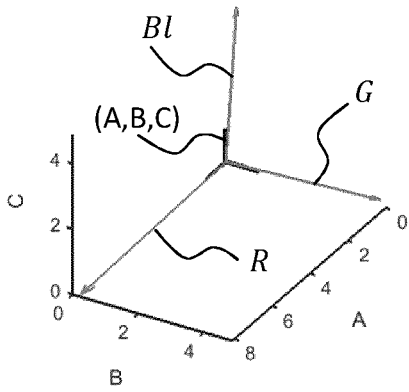


FIG 8a

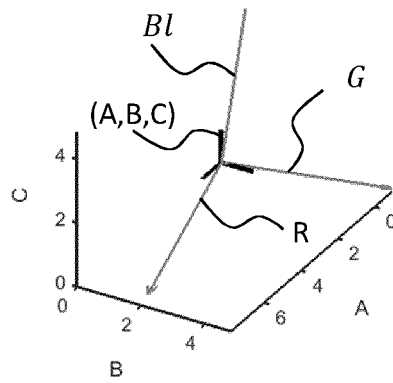


FIG 8b

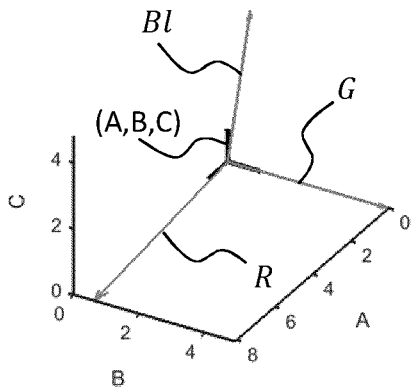


FIG 8c

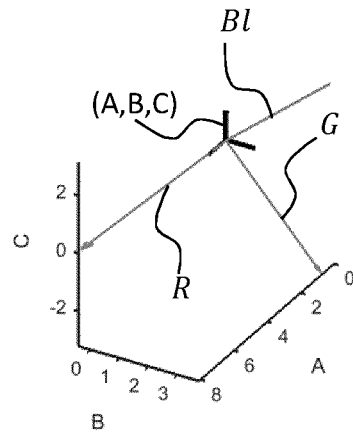


FIG 8d

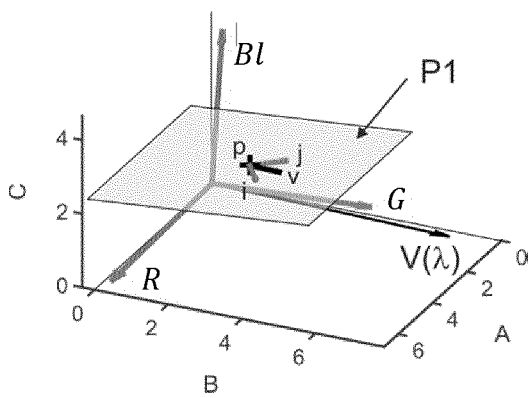


FIG 9a

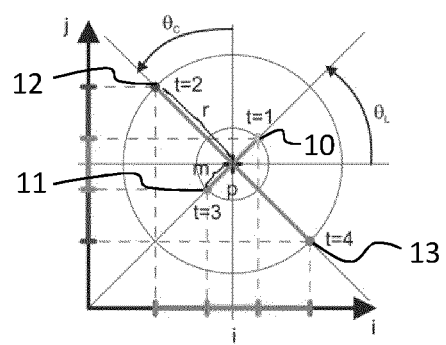


FIG 9b

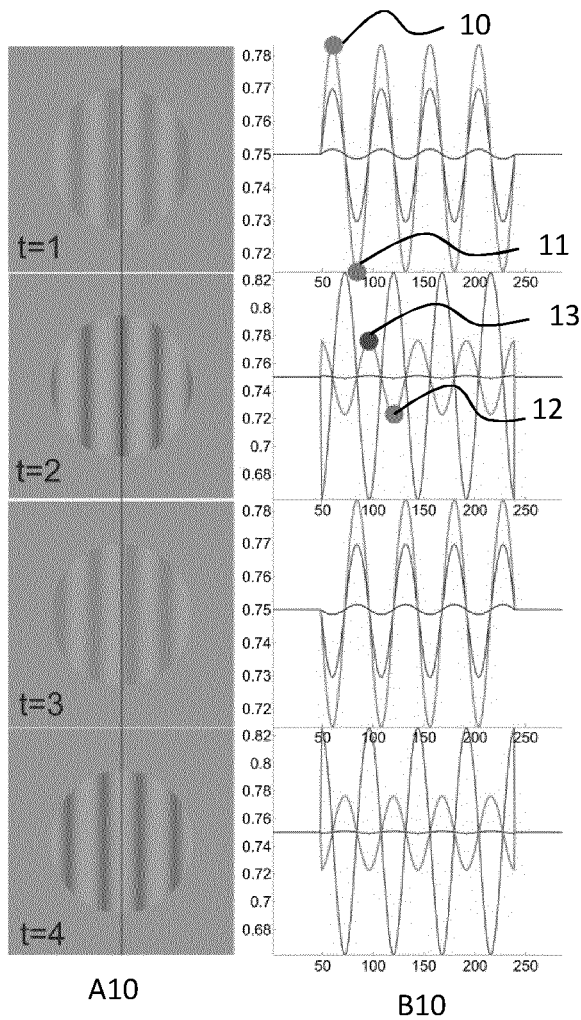


FIG 10

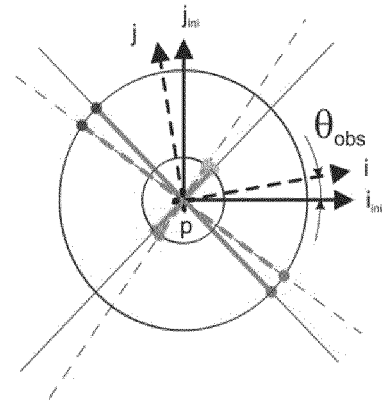


FIG 11a

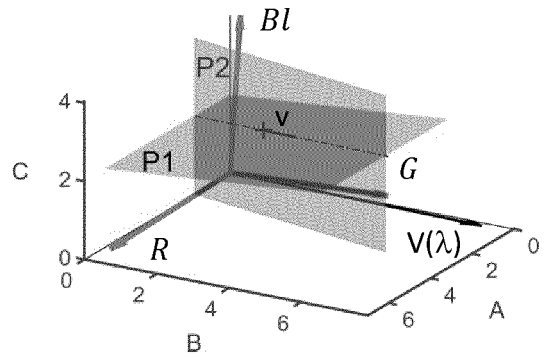


FIG 11b

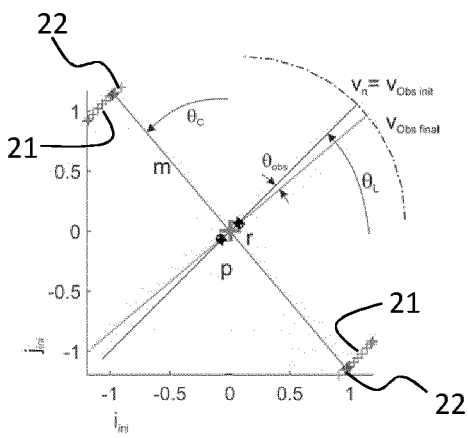


FIG 12a

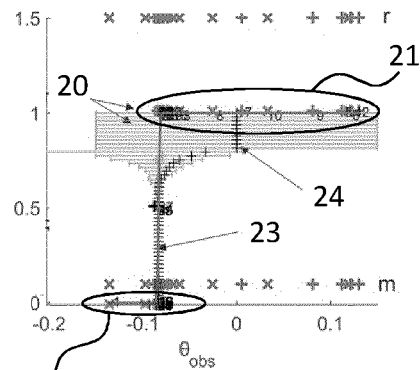


FIG 12b

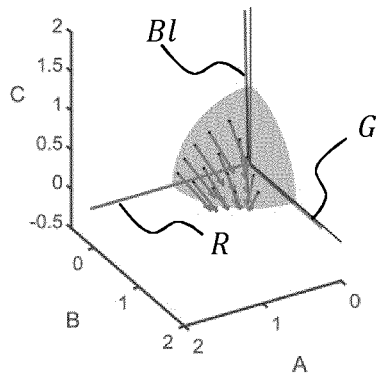


FIG 13a

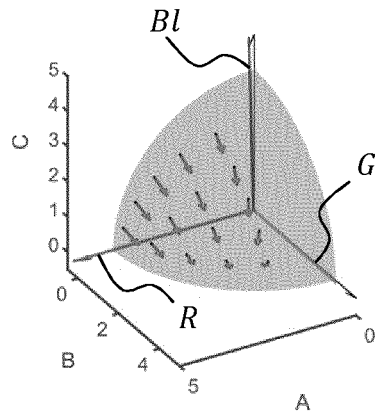


FIG 13b

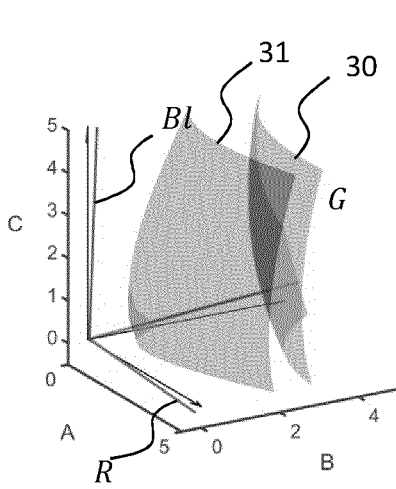


FIG 13c

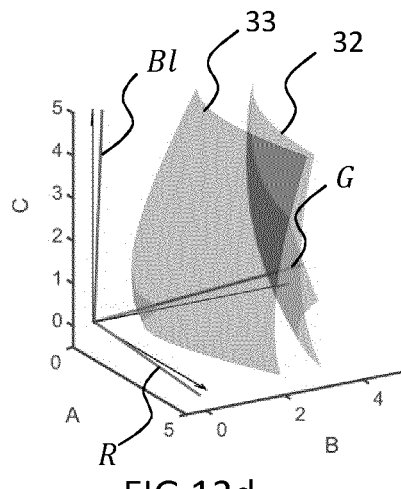


FIG 13d

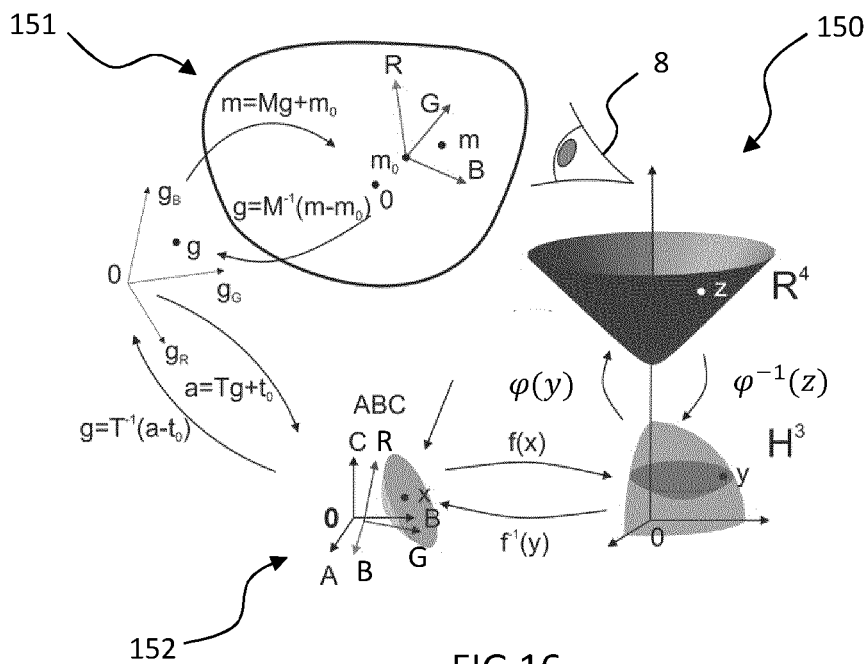


FIG 16

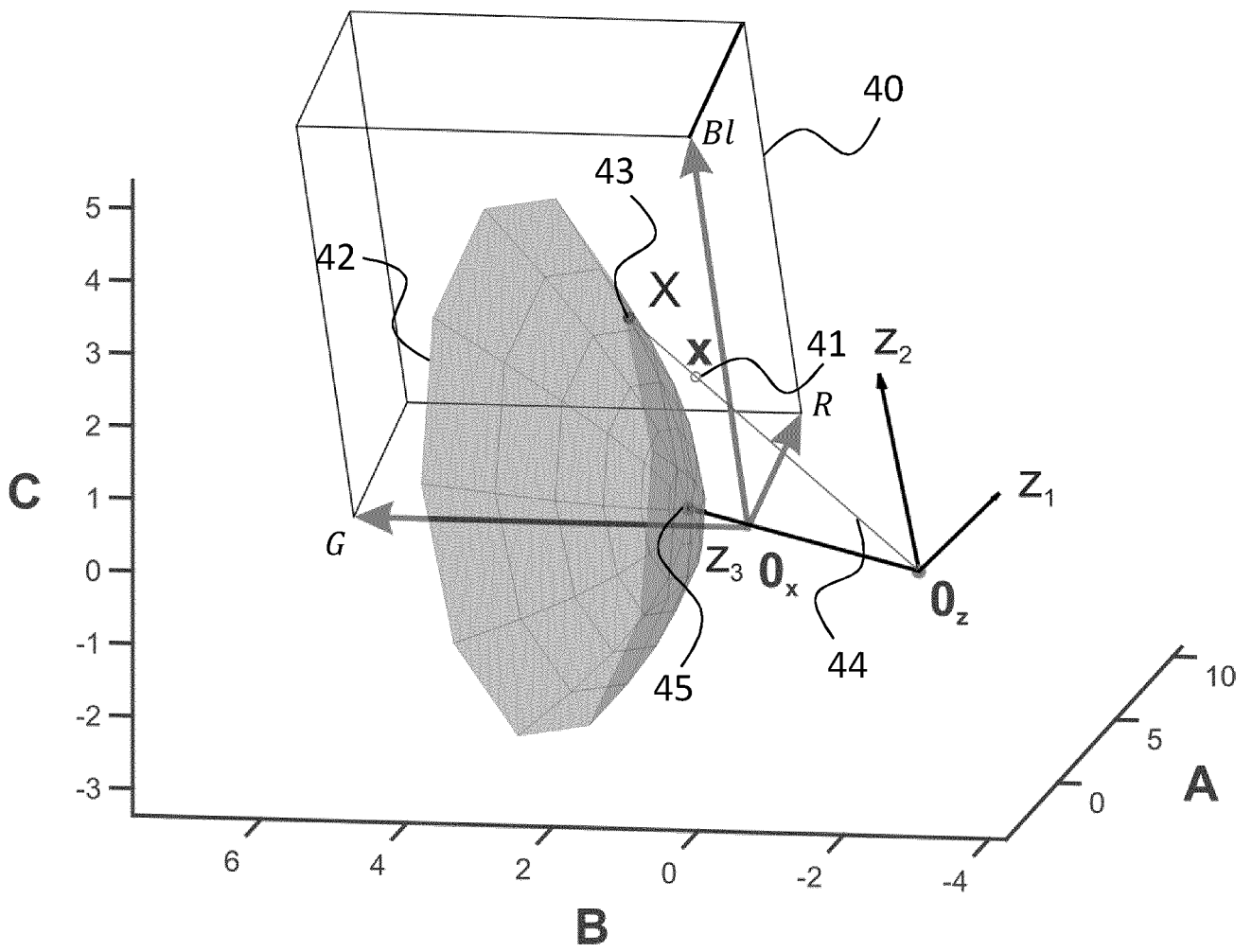


FIG 14

# RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

## OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

---

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

## CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

---

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

## DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

---

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

**1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION**

US 2013/154903 A1 (KIM JIN SEO [KR])  
20 juin 2013 (2013-06-20)

Michael A Webster ET AL: "Motion Minima for Different Directions in Color Space INTRODUCTION",  
Vision Res.  
ElsevierScienceLtd.AUrightsreserved,  
1 janvier 1997 (1997-01-01), pages  
147-1498, XP055579974,  
Extrait de l'Internet:  
URL:<https://core.ac.uk/download/pdf/82236626.pdf>

CROPPER ET AL: "The detection of motion in chromatic stimuli: first-order and second-order spatial structure",  
VISION RESEARCH, PERGAMON PRESS, OXFORD, GB,  
vol. 45, no. 7, 1 mars 2005 (2005-03-01),  
pages 865-880, XP027613338,  
ISSN: 0042-6989  
[extrait le 2005-03-01]

IVAR FARUP: "Hyperbolic geometry for colour metrics",  
OPTICS EXPRESS,  
vol. 22, no. 10, 14 mai 2014 (2014-05-14),  
page 12369, XP055579992,  
DOI: 10.1364/OE.22.012369

**2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL**

NEANT

**3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES**

NEANT