

PROCEDE ET DISPOSITIF DE MESURE DE LA COULEUR D'UN OBJET

Domaine de l'invention

5 La présente invention se rapporte au domaine de la mesure de la couleur.

La présente invention se rapporte plus particulièrement à un procédé de spectrométrie pour mesurer la couleur d'un objet mettant en œuvre un dispositif électronique, et au dispositif associé.

10

Etat de la technique

Une couleur est un flux lumineux perçu par l'œil humain. Il s'agit d'une distribution spectrale d'énergie $C(\lambda)$ sur une bande de longueurs d'onde, en l'occurrence λ variant de 380 à 780 nm pour le visible (observateur standard CIE 1931). Dans la suite, nous désignerons par une lettre et un λ entre parenthèses la fonction qui décrit cette distribution spectrale d'énergie.

20 Du fait de la synthèse additive, toute couleur peut être exprimée par ses coordonnées trichromatiques selon trois couleurs primaires. Il existe plusieurs systèmes de primaires, nous retiendrons dans la suite les deux normalisés que sont l'espace CIE XYZ (et sa variante CIE Yxy avec plan de chromacité à luminance constante) et l'espace CIE L^*a^*b qui permet d'estimer une différence de couleur avec une norme euclidienne appelée « deltaE », qui est représentative des différences de couleur perçues par l'œil humain. Le « gamut » (limites) de ces deux espaces couvre l'intégralité du visible humain. Nous feront aussi référence à l'espace trichromatique sRGB correspondant au gamut de référence de la plupart des équipements électroniques actuels. Le gamut du sRGB ne couvre pas l'ensemble du visible humain, notamment dans les bleus-verts.

30

La couleur d'un objet résulte des interactions entre un flux lumineux incident et la surface dudit objet. Trois phénomènes entrent en concurrence pour donner à la matière l'apparence qu'on lui connaît : l'absorption, la réflexion

spéculaire et la réflexion diffuse. La réflexion spéculaire se produit à la surface de l'objet. Il y a peu d'interaction de la lumière avec la matière de l'objet – et notamment ses pigments. La couleur de la lumière réfléchie est donc proche de la lumière reçue, mais l'énergie réfléchie est concentrée dans un lobe centré dans la direction théorique définie par les lois de Snell-Descartes. A contrario, la réflexion diffuse a lieu plus en profondeur. La lumière émise est teintée de la couleur des pigments et l'énergie réfléchie est indépendante de la direction d'observation. Autrement dit, la réflexion spéculaire est la composante brillante d'une surface et la réflexion diffuse est la composante matte et colorée d'une surface.

Par conséquent, la couleur d'un objet dépend de deux facteurs indépendants : l'éclairement auquel l'objet est soumis et la nature de la surface de l'objet. Cette dernière est caractérisée par la fonction de « réflectance spectrale bidirectionnelle ». Elle est définie comme le rapport entre la luminance réfléchie par la surface et l'éclairement de celle-ci. La valeur de cette fonction dépend de la longueur d'onde λ , de la direction de la lumière incidente et de la direction d'observation. La réflectance diffuse uniforme de l'objet $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$, correspondant à la réflexion diffuse, ne dépend que de la longueur d'onde λ . C'est elle qui donne l'information de couleur au sens chromatique, hors phénomène de brillance.

C'est pourquoi la couleur d'un objet peut être caractérisée 1) par la lumière réfléchie sous un illuminant donné (par exemple les coordonnées trichromatiques CIE L^*a^*b sous un illuminant D50 dans une salle noire) ou, mieux, 2) par sa réflectance spectrale $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$. La première méthode requiert des dispositifs de mesure relativement simples (entre autres, les nuanciers de couleurs, les colorimètres tri-stimulus), mais avec un fort risque de métamérisme (cette méthode est peu précise). Son utilisation est généralement restreinte au suivi des variations par rapport à une couleur étalon le long d'un processus de fabrication (imprimerie, textile, arts graphiques, etc.). La deuxième méthode nécessite des dispositifs plus sophistiqués (entre autres, spectromètre à diffraction, spectromètre à double-photorécepteurs en parallèle) ; elle n'est pas affectée par le métamérisme (cette méthode est très

précise) et elle permet de simuler la perception de la couleur sous différents illuminants (intérieur, extérieur). Elle est destinée aux professionnels exigeants et aux activités de conception.

5 Tous ces dispositifs ne sont pas compatibles avec une utilisation nomade et non planifiée comme avec un téléphone portable ou une tablette électronique que l'on emmène partout. Leur usage est relativement compliqué, sans oublier le coût additionnel significatif qu'ils représentent.

10 A contrario, les applications de mesure de la couleur disponibles actuellement sur les téléphones portables ou tablettes (iOS, Android...) ne nécessitent pas un équipement annexe spécialisé, mais ces applications ne permettent pas une mesure fidèle des couleurs. En effet, elles reposent
15 uniquement sur l'utilisation du capteur d'image couleur de l'appareil (réseau de photodétecteurs tri-stimulus, matrice de Bayer rouge-vert-bleu) avec un programme de calcul de la balance des blancs. Leur perception des couleurs des objets est donc faussée par la variabilité inconnue de l'éclairage
 environnant.

20 L'art antérieur connaît le spectromètre émissif à diffraction et un procédé de détermination de la fonction de réflectance spectrale de l'objet : le dispositif produit un illuminant étalonné blanc $S(\lambda)$ en direction de la cible, l'illuminant se réfléchit sur l'objet, puis passe à travers un prisme pour y être diffracté vers
25 plusieurs dizaines de photodétecteurs (un par sous-spectre) qui permettent d'interpoler $E(\lambda)$, d'où $R^{OBJ}(\lambda) = E(\lambda)/S(\lambda)$. Le fonctionnement de la mesure de couleur d'un objet avec ce procédé de l'art antérieur est réalisé avec un boîtier développé spécialement et avec un procédé nécessitant un cache pour
 masquer tout illuminant extérieur inconnu. De plus, ce type de spectromètre ne permet pas de réaliser une photographie spectrométrique.

30

 L'art antérieur connaît, par le brevet américain N° US5963333, un spectromètre à LED et double photorécepteurs placés en parallèle, un boîtier de détection à spectromètre et un procédé de détermination de la fonction de

réflectance spectrale de l'objet. La mesure de couleur d'un objet avec ce procédé de l'art antérieur est réalisée au moyen d'un boîtier développé spécialement et avec un procédé nécessitant un cache pour masquer tout illuminant extérieur inconnu. De plus, ce type de spectromètre ne permet pas
5 de réaliser une photographie spectrométrique.

L'art antérieur connaît également, par la demande de brevet PCT N° WO 2004/079314, un colorimètre, un boîtier de détection à colorimètre et un procédé de détermination de la couleur d'un objet en calculant un écart par
10 rapport à une couleur étalon. Le fonctionnement de la mesure de couleur avec ce procédé de l'art antérieur est réalisé avec un boîtier développé spécialement, un procédé nécessitant un cache pour masquer tout illuminant extérieur inconnu, et un procédé incapable de mesurer une fonction de réflectance spectrale proprement dite.

15 L'art antérieur connaît également, par la demande de brevet britannique N° GB2474701A, un colorimètre, un boîtier de détection à colorimètre et un procédé de détermination de la couleur d'un objet en calculant un écart par rapport à une couleur étalon. La mesure de couleur avec ce procédé de l'art
20 antérieur est réalisée au moyen d'un téléphone équipé d'un écran pour l'émission de flashes de couleur et d'un appareil photo sur la face opposée. La mesure de couleur avec ce procédé de l'art antérieur est réalisée avec des guides d'onde développés spécialement (jeux de miroir, fibres optiques, etc.), un procédé nécessitant un cache ou des guides d'onde pour masquer tout
25 illuminant extérieur inconnu, et un procédé incapable de mesurer une fonction de réflectance spectrale proprement dite.

Exposé de l'invention

30

La présente invention entend remédier aux inconvénients de l'art antérieur en proposant un procédé de mesure de la couleur d'un objet par spectrométrie utilisant comme émetteur un moyen apte à émettre des illuminants de couleurs, et comme récepteur un capteur électronique d'image

couleur, les deux situés côte à côte, en présence ou non d'un illuminant extérieur inconnu (mais constant pour tous les flashes).

Dans le principe, la présente invention fonctionne à l'opposé d'un spectromètre émissif à diffraction : au lieu de générer un seul illuminant étalonné et de l'analyser avec plusieurs dizaines de photodétecteurs, la présente invention génère plusieurs dizaines d'illuminants étalonnés et les analyse avec simplement trois photodétecteurs.

A cet effet, la présente invention concerne, dans son acception la plus générale, un procédé de mesure de la réflectance diffuse uniforme $R^{OBJ}(\lambda)$ en au moins un point d'un objet à l'aide d'un dispositif comportant un moyen apte à émettre des illuminants de couleur exprimés sous la forme de flux lumineux et un capteur électronique d'images couleurs, caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes :

- placement dudit objet dans une zone se trouvant en face de et sensiblement perpendiculairement audit moyen apte à émettre des illuminants de couleur sous la forme de flux lumineux de couleurs et se trouvant dans le champ de vision dudit capteur électronique d'images couleurs, ledit objet étant également soumis à un illuminant extérieur sous la forme d'un flux lumineux extérieur environnant $I^{ext}(\lambda)$ inconnu et constant où λ désigne la longueur d'onde, émission par ledit moyen d'une série de N illuminants $S^{source}(\lambda)_i$ (avec N entier naturel supérieur à un, i variant de 1 à N et λ la longueur d'onde), $S^{source}(\lambda)_i$ étant connu en fonction des paramètres d'entrée dudit moyen apte à émettre des flux lumineux de couleurs, capture par ledit capteur électronique d'images couleurs du flux lumineux réfléchi en au moins un point dudit objet et entrant dans le capteur, ledit flux lumineux étant noté $E^{capteur}(\lambda)_i$, avec N entier naturel strictement supérieur à deux, i variant de 1 à N et λ la longueur d'onde, et obtention de N équations « E_i » : $E^{capteur}(\lambda)_i = R^{OBJ}(\lambda) * (I^{ext}(\lambda) +$

$S^{source}(\lambda)_i$ en raison du caractère additif de la lumière ondulatoire et par définition de la réflectance diffuse uniforme $R^{OBJ}(\lambda)$ en au moins un point de l'objet ; et

- détermination par ledit dispositif des deux fonctions inconnues continues $R^{OBJ}(\lambda)$ et $I^{ext}(\lambda)$ en résolvant le système des N équations E_i :

– en intégrant chaque équation E_i sur l'intersection des spectres source et capteur, en notant x, y et z les sensibilités dans la base colorimétrique choisie, chaque équation E_i générant alors trois équations « E_i intégrée » :

$$\begin{aligned} & \int (E^{capteur}(\lambda)_i * x(\lambda) * d\lambda) - \int ((R^{OBJ}(\lambda) * (I^{ext}(\lambda) + S^{source}(\lambda)_i)) * x(\lambda) * d\lambda) \\ & \int (E^{capteur}(\lambda)_i * y(\lambda) * d\lambda) - \int ((R^{OBJ}(\lambda) * (I^{ext}(\lambda) + S^{source}(\lambda)_i)) * y(\lambda) * d\lambda) \\ & \int (E^{capteur}(\lambda)_i * z(\lambda) * d\lambda) - \int ((R^{OBJ}(\lambda) * (I^{ext}(\lambda) + S^{source}(\lambda)_i)) * z(\lambda) * d\lambda), \end{aligned}$$

– en calculant la valeur numérique correspondant au terme de gauche des équations E_i intégrée à l'aide des paramètres de sortie du capteur numérique d'image ; et

– en exprimant les deux fonctions inconnues continues $R^{OBJ}(\lambda)$ et $I^{ext}(\lambda)$ à l'aide d'un nombre fini de points d'interpolation (λ_j, y_j) reliés par au moins une fonction d'interpolation $s(\lambda)$ pour conserver le caractère continu desdites fonctions inconnues continues $R^{OBJ}(\lambda)$ et $I^{ext}(\lambda)$, les λ_j étant des longueurs d'onde choisies dans l'intersection des spectres source et capteur et étant des paramètres d'entrée du procédé, choisis pour minimiser le nombre de points d'interpolation à précision donnée ; et

– en recherchant les paramètres y_j des fonctions $R^{OBJ}(\lambda)$ et $I^{ext}(\lambda)$ qui minimisent le système de moindres carrés $\|A * X - B\|_2$ résultant des équations E_i intégrées.

5 Ainsi, le procédé selon la présente invention permet de mesurer précisément la réflectance diffuse uniforme d'un objet en au moins un point, et ceci de manière optimisée par rapport aux solutions décrites dans l'art antérieur. De plus, la présente invention fonctionne parfaitement avec des appareils nomades du quotidien.

Avantageusement, ledit procédé comporte en outre une étape de détermination de la valeur de l'illuminant extérieur $I^{\text{ext}}(\lambda)$.

10 De préférence, ledit procédé comporte en outre une étape de transcription de la fonction $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ de réflectance diffuse uniforme en au moins un point de l'objet en coordonnées CIE XYZ pour un illuminant donné.

15 Selon un mode de réalisation, le nombre de flashes est du même ordre de grandeur que le nombre de points d'interpolation pour déterminer les valeurs de la réflectance diffuse uniforme $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ en au moins un point de l'objet et de l'illuminant extérieur $I^{\text{ext}}(\lambda)$.

20 Selon une variante, ledit procédé comporte une étape de détermination des valeurs de la réflectance diffuse uniforme $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ en au moins un point de l'objet et de l'illuminant extérieur $I^{\text{ext}}(\lambda)$ dans plusieurs bandes spectrales.

Selon un mode de réalisation, ledit dispositif met en œuvre un écran pour émettre les flashes de couleur et un capteur électronique d'image pour capter la lumière réfléchie par l'objet-cible.

25 Selon un mode de mise en œuvre particulier, ledit dispositif est un appareil photo ou une caméra avec flash intégré ou amovible.

Avantageusement, ledit dispositif met en œuvre des guides d'onde pour faire transiter l'émission et la réception des flashes de couleurs.

Selon une variante, ledit procédé est mis en œuvre pour réaliser des photographies spectrométriques d'objets et pour réaliser des adaptations chromatiques (balance des blancs) à volonté.

5 Selon une autre variante, ledit procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il est mis en œuvre pour mesurer la couleur d'un élément compris dans le groupe suivant : matériaux, solides, liquides, gaz, peintures, tapisseries, graphismes, textiles, plastiques, bois, métaux, sols, minéraux, végétaux et aliments.

10 Selon un mode de réalisation, ledit procédé est mis en œuvre pour la mesure des couleurs à but médical ou cosmétique sur l'homme et le vivant d'au moins un élément compris dans le groupe suivant : peau, boutons, grains de beauté, chevelure, pelage, maquillage, et dents.

Selon une variante, ledit procédé est mis en œuvre pour l'utilisation de codes-barres en couleur, à une ou plusieurs dimensions.

15 Selon un mode de mise en œuvre particulier, ledit procédé est mis en œuvre dans un but d'assistance aux personnes daltoniennes et/ou aveugles.

20 La présente invention se rapporte également à un dispositif comportant un moyen apte à émettre des illuminants de couleur sous la forme de flux lumineux de couleurs et un capteur électronique d'images couleurs, de mesure de la réflectance diffuse uniforme $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ en au moins un point d'un objet placé dans une zone se trouvant en face de et sensiblement perpendiculairement audit moyen apte à émettre des couleurs et se trouvant dans le champ de vision dudit capteur

25 électronique d'images couleurs et étant soumis à un illuminant extérieur sous la forme d'un flux lumineux extérieur environnant noté $I^{\text{ext}}(\lambda)$, constant et inconnu, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens pour :

• émettre une série de N illuminants $S^{\text{source}}(\lambda)_i$ (avec N entier naturel strictement supérieur à deux, i variant de 1 à N et λ la longueur d'onde), $S^{\text{source}}(\lambda)_i$ étant connu en fonction des paramètres

30 d'entrée dudit moyen apte à émettre des flux lumineux de

couleurs, capture par ledit capteur électronique d'image couleur (12) du flux lumineux réfléchi en au moins un point de l'objet et entrant dans le capteur, ledit flux lumineux étant noté $E^{\text{capteur}}(\lambda)_i$, avec N entier naturel supérieur à un, i variant de 1 à N et λ la longueur d'onde, et obtention de N équations (E_i) : $E^{\text{capteur}}(\lambda)_i = R^{\text{OBJ}}(\lambda) * (I^{\text{ext}}(\lambda) + S^{\text{source}}(\lambda)_i)$, en raison du caractère additif de la lumière ondulatoire et par définition de la réflectance diffuse uniforme $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ en au moins un point de l'objet ; et

- déterminer les deux fonctions inconnues continues $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ et $I^{\text{ext}}(\lambda)$ en résolvant le système des N équations E_i :

- en intégrant chaque équation E_i sur l'intersection des spectres source et capteur, en notant x , y et z les sensibilités dans la base colorimétrique choisie, chaque équation E_i générant alors trois équations « E_i intégrée » :

$$\int (E^{\text{capteur}}(\lambda)_i * x(\lambda) * d\lambda) - \int ((R^{\text{OBJ}}(\lambda) * (I^{\text{ext}}(\lambda) + S^{\text{source}}(\lambda)_i)) * x(\lambda) * d\lambda)$$

$$\int (E^{\text{capteur}}(\lambda)_i * y(\lambda) * d\lambda) - \int ((R^{\text{OBJ}}(\lambda) * (I^{\text{ext}}(\lambda) + S^{\text{source}}(\lambda)_i)) * y(\lambda) * d\lambda)$$

$$\int (E^{\text{capteur}}(\lambda)_i * z(\lambda) * d\lambda) - \int ((R^{\text{OBJ}}(\lambda) * (I^{\text{ext}}(\lambda) + S^{\text{source}}(\lambda)_i)) * z(\lambda) * d\lambda),$$

- en calculant la valeur numérique correspondant au terme de gauche des équations E_i intégrée à l'aide des paramètres de sortie du capteur numérique d'image ; et

- en exprimant les deux fonctions inconnues continues $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ et $I^{\text{ext}}(\lambda)$ à l'aide d'un nombre fini de points d'interpolation (λ_j, y_j) reliés par au moins une fonction d'interpolation $s(\lambda)$ pour conserver le caractère continu desdites fonctions inconnues continues $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ et $I^{\text{ext}}(\lambda)$, les λ_j étant des longueurs d'onde choisies dans l'intersection des spectres source et capteur et étant des paramètres d'entrée du procédé, choisis pour minimiser le nombre de points d'interpolation à précision donnée ; et

- en recherchant les paramètres y_j des courbes $R^{OBJ}(\lambda)$ et $I^{ext}(\lambda)$ qui minimisent le système de moindres carrés $\|A^*X-B\|_2$ résultant des équations E_i intégrées.

Brève description des dessins

On comprendra mieux l'invention à l'aide de la description, faite ci-après à titre purement explicatif, d'un mode de réalisation de l'invention, en référence aux Figures dans lesquelles :

- la Figure 1 illustre de façon schématique le dispositif selon la présente invention ; et
- la Figure 2 représente les différentes étapes du procédé selon la présente invention ;
- la Figure 3 décrit le non-recouvrement systématique des bandes de longueurs d'ondes intervenant dans le cadre du procédé selon la présente invention : œil humain, capteur, source, mesure ; et les Figures 4, 5, 6, 7 et 8 illustrent l'algorithme de flashage, en l'occurrence la génération de grilles successives pour répartir de la façon la plus homogène possible N flashes au sein du triangle de flashage.

Description détaillée des modes de réalisation de l'invention

A titre de remarque préliminaire, on notera que les notations dans ce paragraphe sont : capteur= capteur électronique d'images couleurs (la fonction vidéo n'est pas utilisée dans le cadre de l'étalonnage, seule est utilisée la prise d'images statiques), source= source des illuminants/flashes de couleurs (écran, diode(s), laser(s), etc.) ; $(R,G,B)^{source}_i$ = paramètres d'entrée non-linéaires de chrominance de la source des illuminants de couleurs ($RGBW^{source}_i$ ou $RGBY^{source}_i$ pour des dispositifs à 4 primaires et plus), BL^{source}_i = paramètre d'entrée non-linéaire de luminance de la source des illuminants de couleurs (par exemple le rétroéclairage d'un écran LCD) ; $(R,G,B)^{capteur}_i$ = paramètres de sortie non linéaires de chrominance du flux lumineux capté par le capteur d'images couleurs, $BV^{capteur}_i$ = paramètre de sortie non linéaire de luminance du flux lumineux capté par le capteur d'images couleurs (par exemple la Brightness Value de la norme japonaise EXIF) ; OBJ= objet de couleur à mesurer ; EXT=illuminant extérieur environnant ; R/G/B = équation valable pour

chaque primaire rouge (red) ou verte (green) ou bleue (blue); OBJ/EXT =
 équation valable pour l'objet de couleur ou pour l'illuminant extérieur ; $x/y/z(\lambda)$ =
 équation valable pour chaque sensibilité spectrale $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ et $z(\lambda)$; sensibilités
 spectrales de l'observateur standard CIE 1931 = $x^{EC_CIE_1931}(\lambda)$, $y^{EC_CIE_1931}(\lambda)$,
 5 $z^{EC_CIE_1931}(\lambda)$ pour $\lambda \in [380\text{nm}; 780\text{nm}]$; sensibilités spectrales du capteur
 électronique d'images couleur : $x^{EC_capteur}(\lambda)$, $y^{EC_capteur}(\lambda)$, $z^{EC_capteur}(\lambda)$. Les
 notations en exposant EC_XXX signifient que l'on se situe dans l'espace
 colorimétrique XXX.

10 Dans les figures et l'exemple de réalisation décrit ci-dessous, le moyen
 11 apte à émettre des couleurs est un écran émissif. Il est entendu que ce
 moyen 11 apte à émettre des couleurs peut également être une ou plusieurs
 diode(s) multicolore(s), un ou plusieurs laser(s) multicolore(s), un ou plusieurs
 flash(s) colorés ou tout autre moyen apte à émettre des « couleurs »
 15 (une « couleur » = une fonction spectrale d'énergie dans la gamme de longueur
 d'ondes considérée). En outre, dans les figures et l'exemple de réalisation
 décrits ci-dessous, la couleur de l'objet est réduite à la réflectance uniforme
 diffuse. Il est entendu que ledit procédé est apte à capter les autres
 composantes de réflectance, en particulier la réflectance spéculaire pour les
 20 objets brillants et satinés via l'affichage à l'écran d'une figure blanche sur fond
 noir et la détection du lobe de réflexion spéculaire résultant par une analyse de
 gradient dans le plan focal image du capteur d'images couleurs.

La Figure 1 représente sur une coupe schématique le dispositif 10 selon
 25 l'invention pour mesurer les couleurs d'un objet et de la lumière environnante
 extérieure : l'objet 30 à mesurer de couleur $R^{OBJ}(\lambda)$; le moyen apte à émettre
 des couleurs 11 capable d'émettre des illuminants connus $S^{source}(\lambda)$; la lumière
 environnante extérieure 40 $I^{EXT}(\lambda)$; le capteur électronique d'image couleurs 12
 caractérisant en chrominance et luminance le flux lumineux réfléchi $E^{capteur}(\lambda)$; ;
 30 l'application informatique 13 « colorimétriquement pré-étalonnée » qui pilote
 l'ensemble et interagit avec l'opérateur

Dans un mode de réalisation, l'application informatique 13 est partiellement ou totalement distribuée dans le réseau ou « *nuage* » (« *cloud* » en terminologie anglo-saxonne).

5 La Figure 2 représente les différentes étapes du procédé selon la présente invention :

- 10 • placement dudit objet 30 dans une zone se trouvant en face de et sensiblement perpendiculairement audit moyen 11 apte à émettre des illuminants de couleur sous la forme de flux lumineux de couleurs et se trouvant dans le champ de vision dudit capteur électronique d'images couleurs 12, ledit objet 30 étant également soumis à un illuminant extérieur sous la forme d'un flux lumineux extérieur environnant 40 $I^{ext}(\lambda)$ inconnu et constant où λ désigne la longueur d'onde, émission par ledit moyen 11 d'une série de N illuminants $S^{source}(\lambda)_i$ (avec N entier naturel supérieur à un, i variant de 1 à N et λ la longueur d'onde), $S^{source}(\lambda)_i$ étant connu en fonction des paramètres d'entrée dudit moyen 11 apte à émettre des flux lumineux de couleurs, capture par ledit capteur électronique d'images couleurs 12 du flux lumineux réfléchi en

15 aumoins un point dudit objet 30 et entrant dans le capteur, ledit flux lumineux étant noté $E^{capteur}(\lambda)_i$, avec N entier naturel supérieur à un, i variant de 1 à N et λ la longueur d'onde, et obtention de N équations « E_i » : $E^{capteur}(\lambda)_i = R^{OBJ}(\lambda) * (I^{ext}(\lambda) + S^{source}(\lambda)_i)$ en raison du caractère additif de la lumière ondulatoire et par définition de la réflectance diffuse uniforme $R^{OBJ}(\lambda)$ en au

20 moins un point de l'objet 30 ; et

25 • détermination par ledit dispositif 10 des deux fonctions inconnues continues $R^{OBJ}(\lambda)$ et $I^{ext}(\lambda)$ en résolvant le système des N équations E_i :

30 – en intégrant chaque équation E_i sur le domaine du visible du capteur, en notant x, y et z les sensibilités dans la base colorimétrique choisie, chaque équation E_i générant alors

trois équations « E_i intégrée » :

$$\int (E^{\text{capteur}}(\lambda)_i * x(\lambda) * d\lambda) - \int ((R^{\text{OBJ}}(\lambda) * (I^{\text{ext}}(\lambda) + S^{\text{source}}(\lambda)_i)) * x(\lambda) * d\lambda)$$

$$\int (E^{\text{capteur}}(\lambda)_i * y(\lambda) * d\lambda) - \int ((R^{\text{OBJ}}(\lambda) * (I^{\text{ext}}(\lambda) + S^{\text{source}}(\lambda)_i)) * y(\lambda) * d\lambda)$$

$$\int (E^{\text{capteur}}(\lambda)_i * z(\lambda) * d\lambda) - \int ((R^{\text{OBJ}}(\lambda) * (I^{\text{ext}}(\lambda) + S^{\text{source}}(\lambda)_i)) * z(\lambda) * d\lambda),$$

- 5
- en calculant la valeur numérique correspondant au terme de gauche des équations E_i intégrée à l'aide des paramètres de sortie du capteur numérique d'image ; et
 - en exprimant les deux fonctions inconnues continues $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ et $I^{\text{ext}}(\lambda)$ à l'aide d'un nombre fini de points d'interpolation (λ_j, y_j) reliés par au moins une fonction d'interpolation $s(\lambda)$ pour conserver le caractère continu desdites fonctions inconnues continues $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ et $I^{\text{ext}}(\lambda)$, les λ_j étant des longueurs d'onde choisies dans l'intersection des spectres source et capteur et étant des paramètres d'entrée du procédé, choisis pour minimiser le nombre de points d'interpolation à précision donnée ; et
 - en recherchant les paramètres y_j des fonctions $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ et $I^{\text{ext}}(\lambda)$ qui minimisent le système de moindres carrés $\|A * X - B\|_2$ résultant des équations E_i intégrées.
- 10
- 15
- 20

La Figure 3 décrit le non-recouvrement systématique des bandes de longueurs d'onde intervenant dans le procédé selon la présente invention :

- 25
- Œil humain : d'après la norme CIE 1931, il perçoit les flux lumineux entre $\lambda_1^{\text{CIE 1931}} = 380 \text{ nm}$ et $\lambda_2^{\text{CIE 1931}} = 780 \text{ nm}$ avec des sensibilités notées $x/y/z^{\text{EC_CIE_1931}}(\lambda)$ d'où l'espace colorimétrique $X/Y/Z^{\text{EC_CIE_1931}}$ par intégration sur $[\lambda_1^{\text{CIE 1931}} ; \lambda_2^{\text{CIE 1931}}]$ bien connu par l'homme de métier ;
 - Capteur : il perçoit les flux lumineux entre $\lambda_1^{\text{capteur}}$ et $\lambda_2^{\text{capteur}}$, avec des sensibilités notées $x/y/z^{\text{EC_capteur}}(\lambda)$ d'où l'espace colorimétrique $XYZ^{\text{EC_capteur}}$ par intégration sur $[\lambda_1^{\text{capteur}} ; \lambda_2^{\text{capteur}}]$,
- 30

à l'instar de l'espace colorimétrique CIE 1931. Il est important de noter que la bande spectrale des capteurs électroniques d'images usuels (CCD, CMOS) couvre une partie d'infra-rouge, en plus du visible humain (sauf si présence d'un filtre infra-rouge) ;

- 5
- Source : la source émet des flashes de couleurs compris dans l'intervalle $[\lambda_1^{\text{source}}; \lambda_2^{\text{source}}]$, tels que $\lambda_1^{\text{source}} = \min(\sum_{i=1}^N (S^{\text{source}}(\lambda)_i > 0))$ et $\lambda_2^{\text{source}} = \max(\sum_{i=1}^N (S^{\text{source}}(\lambda)_i > 0))$. Si la source est un écran LCD de téléphone portable, il est usuel que la bande spectrale couverte soit limitée à [300 nm ; 700nm], c'est-à-dire significativement moins large que celle de l'œil humain [380 nm ; 780 nm] ;
- 10
- Mesure : La mesure des fonctions $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ et $I^{\text{ext}}(\lambda)$ ne peut être réalisée que dans l'intersection des spectres de la source et du capteur que l'on note $[\lambda_1^{\text{mesure}}; \lambda_2^{\text{mesure}}]$. En effet, d'une part, le capteur ne capte rien en dehors de son spectre d'intégration. D'autre part, la matrice $A^T \cdot A$ doit être inversible ce qui est vérifié quand $\sum_{i=1}^N (S^{\text{source}}(\lambda)_i > 0)$ (cf. la fin de la description détaillée et l'annexe 2). Le choix de sensibilités $x/y/z^{\text{EC_mesure}}(\lambda) > 0$ sur $[\lambda_1^{\text{mesure}}; \lambda_2^{\text{mesure}}]$ et nulles en dehors permet de créer un
- 15
- 20
- espace colorimétrique $XYZ^{\text{EC_mesure}}$, à l'instar de l'espace colorimétrique CIE 1931. L'utilisation des sensibilités du capteur est toujours possible, celles de la norme CIE 1931 également si la bande $[\lambda_1^{\text{mesure}}; \lambda_2^{\text{mesure}}]$ est incluse dans [380 nm ; 780 nm].

25

Une conséquence de la Figure 3 et des explications qui viennent d'être données est que le procédé selon l'invention est capable de déterminer les valeurs de la réflectance diffuse uniforme $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ et de l'illuminant extérieur $I^{\text{ext}}(\lambda)$ dans d'autres bandes spectrales que le visible humain, à condition que la

30

source et le capteur soient compatibles avec ces bandes et que la « lumière » conserve un caractère ondulatoire : l'ultraviolet, les infrarouges, etc.

Les figures 4, 5, 6, 7 et 8 illustrent l'algorithme de flashage, en décrivant les grilles k utilisées en fonction d'un nombre croissant de flashes N demandés, pour répartir de la façon la plus homogène possible les flashes dans un triangle de flashage donné, compatible avec les gamuts source et capteur. La suite des grilles k est itérative quand N croît :

- La Figure 4 présente la grille k=1 à utiliser pour N compris entre 1 et 3. La position de chaque flash i est indiquée par son numéro ;
- La Figure 5 présente la grille k=2 à utiliser pour N=4. La position de chaque flash i est indiquée par son numéro ;
- La Figure 6 présente la grille k=3 à utiliser pour N compris entre 5 et 6. La position de chaque flash i est indiquée par son numéro ;
- La Figure 7 présente la grille k=4 à utiliser pour N compris entre 7 et 10. La position de chaque flash i est indiquée par son numéro ;
- La Figure 8 présente la grille k=5 à utiliser pour N compris entre 11 à 15. La position de chaque flash i est indiquée par son numéro.

Décrivons à présent le traitement pour déterminer les inconnues $R^{OBJ}(\lambda)$ et $I^{EXT}(\lambda)$ à partir des N flashes de couleur.

Dans le mode de réalisation présenté Figure 1, l'objet à mesurer 30 est placé sous la source des flashes de couleurs 11 et dans le champ de vision du capteur électronique d'images couleurs 12.

Puis, la source 11 émet successivement une succession de flashes de couleurs en suivant l'algorithme de flashage décrit dans l'annexe 1 qui cherche à optimiser le conditionnement de la matrice A, en restant dans les gamuts écran et caméra et en s'assurant que l'illuminant extérieur reste constant au cours des flashes.

Cet algorithme prend en entrée un nombre de flashes N valides demandés. N dépend du nombre n de points d'interpolation demandés pour déterminer les fonctions $R^{OBJ}(\lambda)$ et $I^{ext}(\lambda)$. Au minimum, $3*N \geq (2n+2)$ pour que le système $A*X=B$ soit correctement déterminé (cf. fin de la description détaillée), donc $N \geq 2/3*(n+1)$.

L'algorithme de flashage renvoie en sortie une séquence de N flashes valides, avec pour chaque flash, les paramètres d'entrée de la source et les paramètres de sortie du capteur. L'indice de la séquence de flashes est noté i.

Nota : Si la précision requise pour déterminer les fonctions $R^{OBJ}(\lambda)$ et $I^{ext}(\lambda)$ est de l'ordre 10 nm, $N \approx n \approx 30$. Compte tenu de la réactivité des composants électroniques courants, l'ensemble du cycle de flashage prend une dizaine de secondes au maximum. Pour une cible non uniforme (par exemple une texture), le procédé utilise un algorithme de stabilisation d'image avec au moins un point de contraste.

Nota : Si la source des flashes de couleurs 11 est un écran émissif, elle est capable de générer un grand nombre de flashes de couleurs, typiquement N pouvant atteindre $2^{24} = 16,7$ millions pour les systèmes RGB en 3x8 bits.

Pour chaque flash i, la lumière émise par la source 11 se reflète sur la cible colorée 30 puis elle arrive dans le capteur d'image 12 ce qui donne l'équation (E_i) : $E^{capteur}(\lambda)_i = R^{OBJ}(\lambda) * (S^{source}(\lambda)_i + I^{EXT}(\lambda))$.

Développons l'équation (E_i) :

$$E^{capteur}(\lambda)_i = R^{OBJ}(\lambda) * [S^{source}(\lambda)_i + I^{EXT}(\lambda)] = R^{OBJ}(\lambda) * S^{source}(\lambda)_i + R^{OBJ}(\lambda) * I^{EXT}(\lambda) ;$$

30

$$\text{Posons } I^{EXT REF}(\lambda) = R^{OBJ}(\lambda) * I^{EXT}(\lambda)$$

$$\text{L'équation } (E_i) \text{ devient : } E^{capteur}(\lambda)_i = R^{OBJ}(\lambda) * S^{source}(\lambda)_i + I^{EXT REF}(\lambda)$$

Premièrement, le procédé va interpoler les fonctions $R^{OBJ}(\lambda)$ et $I^{EXT REF}(\lambda)$ à l'aide d'une fonction spline cubique scellée et de $(n^{OBJ/EXT REF} + 1)$ points d'interpolation de coordonnées $[x_k = \lambda^{OBJ/EXT REF}_k, y_k = y^{OBJ/EXT REF}_k]$ pour $k=0$ à $n^{OBJ/EXT REF}$ tels que :

- 5 - tous les $\lambda^{OBJ/EXT REF}_k$ sont compris dans l'intersection des spectres du capteur et de la source $[\lambda_1^{mesure} ; \lambda_2^{mesure}]$ (cf. Figure 3) avec $\lambda^{OBJ/EXT REF}_0 = \lambda_1^{mesure}$ et $\lambda^{OBJ/EXT REF}_{n^{OBJ/EXT REF}} = \lambda_2^{mesure}$;

- la pente nulle des splines est nulle aux extrémités: $p_0 = p_{n^{OBJ/EXT REF}} = 0$

- 10 Les $y^{OBJ/EXT REF}_k$ sont les inconnues que le procédé va déterminer.

Comme les fonctions $R^{OBJ}(\lambda)$ et $I^{EXT REF}(\lambda)$ sont des fonctions splines scellées à pente nulle aux extrémités, $R^{OBJ}(\lambda)$ et $I^{EXT REF}(\lambda)$ peuvent s'écrire sous une forme linéaire :

15 $R^{OBJ}(\lambda) = \sum_{k=0}^{n^{OBJ/EXT REF}} (y^{OBJ/EXT REF}_k * \Phi^{OBJ}(l, k, \lambda)) : (1)$

$I^{EXT REF}(\lambda) = \sum_{k=0}^{n^{OBJ/EXT REF}} (y^{OBJ/EXT REF}_k * \Phi^{EXT REF}(l, k, \lambda)) : (2)$

avec :

- l entre 1 et $n^{OBJ/EXT REF}$ tel que : $\lambda_{l-1} < \lambda \leq \lambda_l$ et $l=0$ si $\lambda = \lambda_1^{mesure}$;

20

- $\Phi^{OBJ/EXT REF}(l, k, \lambda) = a^{OBJ/EXT REF}_k + b^{OBJ/EXT REF}_k * (\lambda - \lambda_{l-1}) + c^{OBJ/EXT REF}_k * (\lambda - \lambda_{l-1})^2 * (\lambda - \lambda_l) + d^{OBJ/EXT REF}_k * (\lambda - \lambda_{l-1}) * (\lambda - \lambda_l)^2$, pour $k=0$ à $n^{OBJ/EXT REF}$;

- 25 - $a^{OBJ/EXT REF}_k = 0$ pour $k=0$ à $l-1$;

- $a^{OBJ/EXT REF}_{l-1} = 1$;

- $a^{OBJ/EXT REF}_l = 0$;

- $a^{OBJ/EXT REF}_k = 0$ pour $k=l+1$ à $n^{OBJ/EXT REF}$;

- 30 - $b^{OBJ/EXT REF}_k = 0$ pour $k=0$ à $l-1$;

- $b^{OBJ/EXT REF}_{l-1} = 1/(\lambda_{l-1} - \lambda_l)$;

- $b^{OBJ/EXT REF}_l = -1/(\lambda_{l-1} - \lambda_l)$; ;

- $b^{OBJ/EXT REF}_k = 0$ pour $k=l+1$ à $n^{OBJ/EXT REF}$;

- $c_{k}^{OBJ/EXTREF} = (\alpha_{(l,k)}^{OBJ/EXTREF}) / (h_{l-1}^{OBJ/EXTREF})^2$ pour $k=0$ à $l-1$;
- $c_{l-1}^{OBJ/EXTREF} = (\alpha_{(l,l-1)}^{OBJ/EXTREF} - 1/(\lambda_{l-1} - \lambda_l)) / (h_{l-1}^{OBJ/EXTREF})^2$;
- $c_l^{OBJ/EXTREF} = (\alpha_{(l,l)}^{OBJ/EXTREF} + 1/(\lambda_{l-1} - \lambda_l)) / (h_{l-1}^{OBJ/EXTREF})^2$;
- 5 - $c_k^{OBJ/EXTREF} = (\alpha_{(l,k)}^{OBJ/EXTREF}) / (h_{l-1}^{OBJ/EXTREF})^2$ pour $k=l+1$ à $n^{OBJ/EXTREF}$;
- $d_k^{OBJ/EXTREF} = (\alpha_{(l-1,k)}^{OBJ/EXTREF}) / (h_{l-1}^{OBJ/EXTREF})^2$ pour $k=0$ à $l-1$;
- $d_{l-1}^{OBJ/EXTREF} = (\alpha_{(l-1,l-1)}^{OBJ/EXTREF} - 1/(\lambda_{l-1} - \lambda_l)) / (h_{l-1}^{OBJ/EXTREF})^2$;
- $d_l^{OBJ/EXTREF} = (\alpha_{(l-1,l)}^{OBJ/EXTREF} + 1/(\lambda_{l-1} - \lambda_l)) / (h_{l-1}^{OBJ/EXTREF})^2$;
- 10 - $d_k^{OBJ/EXTREF} = (\alpha_{(l-1,k)}^{OBJ/EXTREF}) / (h_{l-1}^{OBJ/EXTREF})^2$ pour $k=l+1$ à $n^{OBJ/EXTREF}$;
- $h_{l-1}^{OBJ/EXTREF} = \lambda_l - \lambda_{l-1}$ pour $l=1$ à $n^{OBJ/EXTREF}$;
- Les $\alpha_{(l,k)}^{OBJ/EXTREF}$ expriment la pente du spline au point l en fonction des
- 15 $y_k^{OBJ/EXTREF}$: $p_l^{OBJ/EXTREF} = \sum_{k=0}^{(n^{OBJ/EXTREF})} (\alpha_{(l,k)}^{OBJ/EXTREF} y_k^{OBJ/EXTREF})$;

- Les $\alpha_{(l,k)}^{OBJ/EXTREF}$ sont calculés par l'inversion (par pivot) du système linéaire suivant, caractéristique des fonctions splines cubiques scellées ; ils sont
- 20 uniquement fonction des λ_l ($l=0$ à $n^{OBJ/EXTREF}$) :
- $p_{l-1}^{OBJ/EXTREF} / h_{l-1}^{OBJ/EXTREF} + p_l^{OBJ/EXTREF} * 2 * (1/h_{l-1}^{OBJ/EXTREF} + 1/h_{l-1}^{OBJ/EXTREF}) + p_{l+1}^{OBJ/EXTREF} / h_{l-1}^{OBJ/EXTREF} = 3 * [(y_{l-1}^{OBJ/EXTREF} - y_l^{OBJ/EXTREF}) / (\lambda_{l-1} - \lambda_l) / h_{l-1}^{OBJ/EXTREF} + (y_l^{OBJ/EXTREF} - y_{l+1}^{OBJ/EXTREF}) / (\lambda_l - \lambda_{l+1}) / h_{l-1}^{OBJ/EXTREF}]$, pour $l=1$ à $N^{OBJ/EXTREF} - 1$;

- 25 Deuxièmement, le procédé connaît la fonction de transfert de la source des flashes de couleurs f^{source} qui donne les fonctions $S^{source}(\lambda)$ en fonction des paramètres d'entrée de la source en chrominance $(R,G,B)^{source}_i = (C^{source} R/G/B)_i$ et en luminance $BL^{source}_i = C^{source} BL_i$. Cette fonction de transfert est déterminée à partir des valeurs théoriques de sortie « usine » du dispositif électronique
- 30 et/ou d'un étalonnage préalable à la mesure. Il est inutile de renouveler obligatoirement cet étalonnage avant chaque mesure de couleur. Cette fonction de transfert est également disponible pour les dispositifs à 4 primaires et plus (rouge-vert-bleu-blanc, rouge-vert-bleu-jaune, etc.)

A titre illustratif, une forme de la fonction de transfert de la source est la suivante en précisant que les dispositifs d'électronique grand public cherchent à respecter le standard sRGB :

- 5 - $f_{\text{source}}(C_{\text{source R/G/B/BL}}^i)(\lambda) = S_{\text{source}}(\lambda)^i$
 - $f_{\text{source}}(C_{\text{source R/G/B/BL}}^i)(\lambda) = C_{\text{source BL}}^{\text{linéaire } i} * (S_{\text{source}}(\lambda)^R + S_{\text{source}}(\lambda)^G + S_{\text{source}}(\lambda)^B)$
 - $C_{\text{source BL}}^{\text{linéaire } i} = ((a_{\text{source BL}} * C_{\text{source BL}}^i + b_{\text{source BL}})^{\gamma_{\text{source BL}}} + c_{\text{source BL}})$;
 - $S_{\text{source}}(\lambda)^{R/G/B} = C_{\text{source R/G/B}}^{\text{linéaire } i} * S_{\text{source}}(\lambda)^{R/G/B \text{ MAX}}$
 10 - $C_{\text{source R/G/B}}^{\text{linéaire } i} = (a_{\text{source R/G/B}} * C_{\text{source R/G/B}}^i + b_{\text{source R/G/B}})^{\gamma_{\text{source R/G/B}}} + c_{\text{source R/G/B}}$

Troisièmement, le procédé connaît la fonction de transfert du capteur électronique d'image couleur f_{capteur} qui donne les coordonnées trichromatiques $(X, Y, Z)^{EC_mesure}$ dans l'espace colorimétrique de mesure, du flux lumineux $E^{\text{capteur}}(\lambda)^i$ entrant dans le capteur, en fonction de ses paramètres de sortie de chrominance $(R, G, B)^{\text{capteur } i} = (C^{\text{capteur R/G/B}}_i)$ et de luminance $BV^{\text{capteur } i} =$
 15 $(C^{\text{capteur BV}}_i)$. Cette fonction de transfert est déterminée à partir des valeurs théoriques de sortie « usine » du dispositif électronique et/ou d'un étalonnage préalable à la mesure. Il est inutile de renouveler obligatoirement cet étalonnage avant chaque mesure de couleur.

A titre illustratif, une forme de la fonction de transfert du capteur électronique d'image couleur est la suivante en précisant que les dispositifs d'électronique grand public cherchent à respecter le standard sRGB :

- Luminance Y: Le procédé extrait de l'EXIF la BrightnessValue BV^{capteur} pour calculer la luminance B^{capteur} du flux lumineux entrant ($BV = \log_2(B/N/K)$ en cd/cm^2) avec $N=1/3,125$ et $K=10,7$, puis le procédé détermine la luminance $Y = K * B$ (K est un paramètre d'étalonnage résultant de pertes diverses: dispersion de la lumière de l'écran, absorption de la lentille, etc.)

- Chrominance $(x,y)^{EC_mesure}$: premièrement, le procédé linéarise les 3 coordonnées $(RGB)^{capteur}$ à l'aide d'une fonction paramétrique gamma (g,a,b) $(f(x)=(a*x+b)^g)$ et il obtient les 3 coordonnées $(RGB_linéaire)^{EC_capteur}$. Deuxièmement, le procédé convertit les 3 $(RGB_linéaire)^{EC_capteur}$ en 3 coordonnées $(RGB_raw)^{EC_capteur}$ par multiplication avec une matrice 3×3 $[WB^{capteur}]$ qui correspond aux valeurs de la balance des blancs. La balance des blancs consiste à réaliser une adaptation chromatique pour passer d'un blanc D65 (référence du sRGB) à un blanc estimé. Troisièmement, le procédé convertit les 3 coordonnées $(RGB_raw)^{EC_capteur}$ en 3 coordonnées $(X,Y,Z)^{EC_mesure}$ par multiplication avec la matrice de passage 3×3 $[P^{EC_capteur \rightarrow EC_mesure}]$ qui correspond à un changement de base vectorielle pour passer de l'espace colorimétrique du capteur à un sous-espace vectoriel qui est l'espace colorimétrique de mesure. Quatrièmement, le procédé convertit les 3 coordonnées $(X,Y,Z)^{EC_mesure}$ en $(x,y)^{EC_mesure}$.

Développons à présent les équations (Ei) en les intégrant sur l'intersection des spectres du capteur et de la source $[\lambda_1^{mesure} ; \lambda_2^{mesure}]$ (cf. Figure 3) pour générer les équations « Ei intégrées »:

$$\begin{aligned}
 & \int_{\lambda_1^{mesure}}^{\lambda_2^{mesure}} (E^{capteur}(\lambda)_i * x/y/z^{EC_mesure}(\lambda) * d\lambda) = \\
 & = \int_{\lambda_1^{mesure}}^{\lambda_2^{mesure}} (R^{OBJ}(\lambda) * S^{source}(\lambda)_i + I^{EXT REF}(\lambda)) * x/y/z^{EC_mesure}(\lambda) * d\lambda ; \\
 & f^{capteur}(C^{capteur R/V/B/BV}_i) X/Y/Z^{EC_mesure} \\
 & = \int_{\lambda_1^{mesure}}^{\lambda_2^{mesure}} (R^{OBJ}(\lambda) * f^{source}(C^{source R/G/B/BL}_i)(\lambda) * x/y/z^{EC_mesure}(\lambda) * d\lambda) \\
 & + \int_{(380\text{ nm})}^{(780\text{ nm})} (I^{EXT REF}(\lambda) * x/y/z^{EC_mesure}(\lambda) * d\lambda) ; \\
 & f^{capteur}(C^{capteur R/V/B/BV}_i) X/Y/Z^{EC_mesure} \\
 & = \int_{\lambda_1^{mesure}}^{\lambda_2^{mesure}} (\sum_{k=0}^{(n OBJ)} (y^{OBJ}_k * \Phi^{OBJ}(l,k,\lambda))) *
 \end{aligned}$$

$$f_{\text{source}}(C_{\text{source R/V/B/BL } i}(\lambda) * x/y/z^{\text{EC_mesure}}(\lambda) * d\lambda) \\ + \sum_i (L_{\text{ambda 1 mesure}})^i (L_{\text{ambda 2 mesure}})^{n - i} (\sum_k (k = 0)^i (n \text{ EXT REF})^{n - i} (y^{\text{EXT REF}} * \Phi^{\text{EXT REF}}(l, k, \lambda)) * x/y/z^{\text{EC_mesure}}(\lambda) * d\lambda) ;$$

5 En permutant l'ordre des sommations, les équations (Ei intégrées) deviennent :

$$f_{\text{capteur}}(C_{\text{capteur R/G/B/BV } i}(\lambda) * x/y/z^{\text{EC_mesure}}(\lambda) * d\lambda) \\ = \\ \sum_i (k = 0)^i (n \text{ OBJ})^{n - i} (y^{\text{OBJ}} * \sum_k (L_{\text{ambda 1 mesure}})^i (L_{\text{ambda 2 mesure}})^{n - i} (\Phi^{\text{OBJ}}(l, k, \lambda) * f_{\text{source}}(C_{\text{source R/G/B/BL } i}(\lambda) * x/y/z^{\text{EC_mesure}}(\lambda) * d\lambda)) \\ + \sum_i (k = 0)^i (n \text{ EXT REF})^{n - i} (y^{\text{EXT REF}} * \sum_k (L_{\text{ambda 1 mesure}})^i (L_{\text{ambda 2 mesure}})^{n - i} (\Phi^{\text{EXT REF}}(l, k, \lambda)) * x/y/z^{\text{EC_mesure}}(\lambda) * d\lambda)) ;$$

$$f_{\text{capteur}}(C_{\text{capteur R/G/B/BV } i}(\lambda) * x/y/z^{\text{EC_mesure}}(\lambda) * d\lambda) \\ = \\ \sum_i (k = 0)^i (n \text{ OBJ})^{n - i} (y^{\text{OBJ}} * (\sum_l (L_{\text{ambda l}} - 1)^i (L_{\text{ambda l}})^{n - i} (\Phi^{\text{OBJ}}(l, k, \lambda) * f_{\text{source}}(C_{\text{source R/G/B/BL } i}(\lambda) * x/y/z^{\text{EC_mesure}}(\lambda) * d\lambda)))) \\ + \sum_i (k = 0)^i (n \text{ EXT REF})^{n - i} (y^{\text{EXT REF}} * (\sum_l (L_{\text{ambda l}} - 1)^i (L_{\text{ambda l}})^{n - i} (\Phi^{\text{EXT REF}}(l, k, \lambda)) * x/y/z^{\text{EC_mesure}}(\lambda) * d\lambda)))) ;$$

$$25 \quad \text{Posons } n^{\text{OBJ+EXT REF}} = (n^{\text{OBJ}} + 1) + (n^{\text{EXT REF}} + 1) ;$$

Posons le vecteur $X^{\text{OBJ+EXT REF}}$ de dimension $n^{\text{OBJ+EXT REF}}$ tel que :

$$(X^{\text{OBJ+EXT REF}})^T = (y^{\text{OBJ}}_0, \dots, y^{\text{OBJ}}_{n^{\text{OBJ}}}, y^{\text{EXT REF}}_0, \dots, y^{\text{EXT REF}}_{n^{\text{EXT REF}}}) ; \\ (X^{\text{OBJ+EXT REF}})^T = (X^{\text{OBJ+EXT REF}}_1, \dots, X^{\text{OBJ+EXT REF}}_{n^{\text{OBJ+EXT REF}}}) ;$$

30

Posons les variables $\Phi^{\text{OBJ+EXT REF}}(i, k, X/Y/Z^{\text{EC_mesure}})$ telles que :

$$\begin{aligned}
& - \text{si } 1 \leq k \leq n^{\text{OBJ}} + 1 : \Phi^{\text{OBJ+EXT REF}}(i, k', X/Y/Z^{\text{EC_mesure}}) = \\
& \quad \left(\sum_{l=1}^{n^{\text{OBJ}}} (l-1) \Phi^{\text{OBJ}}(l, k-1, \lambda) \cdot f^{\text{source}}(C^{\text{ECR}}_{\text{R/V/B/BL}}(i)(\lambda)) \cdot X/Y/Z^{\text{EC_mesure}}(\lambda) \cdot d\lambda \right); \\
& - \text{si } n^{\text{OBJ}} + 2 \leq k' \leq n^{\text{OBJ}} + n^{\text{EXT REF}} + 2 : \Phi^{\text{OBJ+EXT REF}}(i, k', X/Y/Z^{\text{EC_mesure}}) = \\
5 \quad & \left(\sum_{l=1}^{n^{\text{EXT REF}}} (l-1) \Phi^{\text{EXT REF}}(l, k-n^{\text{OBJ}}-2, \lambda) \cdot X/Y/Z^{\text{EC_mesure}}(\lambda) \cdot d\lambda \right);
\end{aligned}$$

Les équations (Ei intégrées) peuvent s'écrire sous la forme des 3*N équationssuivantes avec comme seules inconnues les $X^{\text{OBJ+EXT REF}}_k$:

$$\begin{aligned}
10 \quad & f^{\text{capteur}}(C^{\text{capteur R/V/B/BV}}(i)) X/Y/Z^{\text{EC_mesure}} = \\
& \sum_{k=1}^{n^{\text{OBJ}} + n^{\text{EXT REF}}} (X^{\text{OBJ+EXT REF}}_k \cdot \Phi^{\text{OBJ+EXT REF}}(i, k, X/Y/Z^{\text{EC_mesure}})) ;
\end{aligned}$$

Posons la matrice jacobienne A de dimension $(3*N ; n^{\text{OBJ+EXT REF}})$:

$$15 \quad \begin{bmatrix} \Phi^{\text{OBJ+EXT REF}}(i=1, k=1, X) & \dots & \Phi^{\text{OBJ+EXT REF}}(i=1, k=n^{\text{OBJ}}+n^{\text{EXT REF}}+2, X) \\ \vdots & \ddots & \vdots \end{bmatrix}$$

Posons le vecteur B égal à $f^{\text{capteur}}(C^{\text{capteur R/V/B/BV}}(i)) X/Y/Z^{\text{EC_mesure}}$ de dimension 3*N (i compris entre 1 et N).

20

Les équations (Ei intégrées) forment alors le système linéaire $A*X = B$.

Le procédé va utiliser l'algorithme des moindres carrés linéaires pour minimiser $\|A.X-B\|_2$. Le minimum est atteint pour : $X_{\text{min}} = (A^T.A)^{-1}.A^T.B$, d'où les

25 valeurs des points d'interpolation de $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ et $I^{\text{EXT REF}}(\lambda)$ et donc $I^{\text{EXT}}(\lambda) = R^{\text{OBJ}}(\lambda)/I^{\text{EXT REF}}(\lambda)$.

Il existe 3 conditions à respecter : on montre que la matrice $A^T.A$ est inversible si et seulement si A est injective, ce qui est vrai avec

30 $\sum_{l=1}^{n^{\text{OBJ}}} (S^{\text{source}}(\lambda)_l) > 0$ sur l'intervalle $[\lambda_1^{\text{mesure}}, \lambda_2^{\text{mesure}}]$ et avec $h = \max(\lambda_{k+1} - \lambda_k)$ suffisamment petit. La démonstration mathématique est décrite dans l'annexe 2. De plus, $X^{\text{OBJ+EXT REF}}_k \geq 0$ pour tous les k car ce sont les ordonnées de flux d'énergie.

La première condition est vérifiée par construction de $[\lambda_1^{\text{mesure}}, \lambda_2^{\text{mesure}}]$ comme intersection des spectres source et capteur (voir Figure 3) et, la deuxième, avec un minimum de points d'interpolation pour $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ et $I^{\text{EXT}}(\lambda)$.

5 Concernant la troisième condition, la recherche de X_{min} est réalisée sous contrainte $X^{\text{OBJ+EXT REF}}_k \geq 0$ pour tous les k , en utilisant, entre autres, l'algorithme NLLS de Lawson et Hanson (Laboratoire JET de la NASA, Solving Least Squares Problems aux éditions SIAM), ou, plus généralement, un algorithme d'optimisation quadratique.

10

Nota : Le procédé est envisageable avec d'autres fonctions d'interpolation en mode linéaire ou non-linéaire. Le mode non-linéaire est également à considérer pour passer d'un système de $3*N$ équations selon les composantes $X/Y/Z^{\text{EC_mesure}}$ à un système de N équations sous forme de
15 normes de type euclidienne ($\|.\|_2$) ou de type ΔE des coordonnées $(X,Y,Z)^{\text{EC_mesure}}$.

Nota : Le procédé fonctionne, d'une part, avec des capteurs donnant accès aux coordonnées (R,G,B_{raw}) et, d'autre part, avec des capteurs ne
20 donnant pas accès aux coordonnées (R,G,B_{raw}) , ne donnant pas accès aux valeurs de la matrice de balance des blancs, mais permettant de verrouiller ces valeurs de balance des blancs pendant le processus de flashage. Dans ce deuxième cas, les valeurs de la matrice des blancs deviennent des inconnues supplémentaires à déterminer (9 au maximum). Pour résoudre ce système
25 $A*X=B$ augmenté des inconnues de balance des blancs, la technique consiste à augmenter le nombre de flashes pour disposer d'un système sur-déterminé, puis à la résoudre soit en mode non linéaire, soit en mode linéaire itératif de la façon suivante (entre autres quand les valeurs possibles des paramètres de la balance des blancs sont compris dans un ensemble fini de valeurs discrètes) :
30 décomposition QR du système avec 2 blocs ($X \mid \text{balance des blancs}$), détermination de X avec le premier bloc en émettant une hypothèse sur les paramètres de balance des blancs, injection des valeurs de X dans le deuxième bloc, détermination des paramètres de balances des blancs, puis réinjection dans le premier bloc pour itérer X , et ainsi de suite.

Deux modes de réalisation de visée sont possibles pour l'invention en mode « colorimètre » afin d'enrichir l'expérience utilisateur et d'améliorer la précision du mode « nuancier » de l'invention :

- 5
- Premier mode de réalisation : écran 11 pointant à l'opposé des yeux de l'utilisateur
 - Second mode de réalisation : écran 11 pointant dans la direction des yeux de l'utilisateur

10 **Premier mode de réalisation : écran pointant à l'opposé des yeux de l'utilisateur**

L'écran 11 affiche une figure blanche sur fond noir (rond/bandes/carré...) pour matérialiser l'endroit à viser, puis l'utilisateur appuie sur le déclencheur
15 utilisé normalement pour prendre une photo (cf. bouton sur le côté pour un iPhone S ou sur le bas de l'écran à l'opposé de la position de la caméra de visioconférence).

Un intérêt particulier de ce premier mode de réalisation est d'être peu
20 sensible à l'environnement lumineux ce qui garantit le fonctionnement de l'invention dans pratiquement tous les lieux usuels, même très lumineux (intérieur, extérieur). Cette qualité repose sur la très courte distance entre la cible, l'écran 11 et le capteur d'image 12, sur la forte luminosité des écrans émissifs et sur le fait qu'il existe plusieurs « barrages » de fait aux rayons
25 lumineux environnants : support de l'écran et du capteur d'image, main/doigt(s) de l'utilisateur sur les côtés.

Second mode de réalisation : écran pointant dans la direction des yeux de l'utilisateur

30

L'écran 11 est posé face à l'illuminant extérieur, typiquement face au ciel. L'utilisateur vient alors placé sur le haut de l'écran l'objet coloré à mesurer (partie proche du capteur d'image). Pour faciliter la manœuvre, l'écran 11 est divisé en deux parties, la partie supérieure proche du capteur d'image 12 sert à émettre les flux lumineux pour la mesure, la partie inférieure sert à donner une boucle de retour à l'utilisateur sur l'endroit qui est pointé (wysiwyg).

Un intérêt particulier de ce second mode de réalisation est de pouvoir mesurer la réflectance de l'écran $R^{\text{ecran}}(\lambda)$.

Le dispositif 10 selon la présente invention permet de transformer en spectromètre tous les équipements électroniques disposant d'un écran émissif 11 et d'un capteur d'image 12 situé à côté, entre autres les téléphones, les tablettes, les PDA (assistants personnels), les ordinateurs et les moniteurs/TV équipés d'une caméra de visioconférence. Il s'adresse aussi par exemple aux appareils photos et les caméscopes disposant d'un écran orientable/amovible.

Le dispositif 10 selon la présente invention permet d'ouvrir de nouveaux usages nomades de mesure fidèle de couleur absolue au quotidien, sans nécessiter un appareil dédié. La liste suivante n'est pas limitative :

- la mesure des couleurs sur des objets en tout genre : matériaux, liquides, gaz, peintures, tapisseries, graphismes, textiles, plastiques, bois, métaux, sols, minéraux, végétaux et aliments... ;
- l'utilisation de codes-barres en couleur (à une ou plusieurs dimensions). ;
- la mesure des couleurs à but médical ou cosmétique sur l'homme et le vivant : peau, boutons, grains de beauté, chevelure, pelage, maquillage, dents... ;
- la mesure des couleurs dans un but d'assistance aux personnes daltoniennes et aveugles ;

- la mesure de la couleur d'objet(s) apparaissant sur une photographie afin de réaliser l'adaptation chromatique et de guider l'algorithme de balance des blancs à la place d'utiliser une mire de couleurs étalonnées annexe.

5 L'invention est décrite dans ce qui précède à titre d'exemple. Il est entendu que l'homme du métier est à même de réaliser différentes variantes de l'invention sans pour autant sortir du cadre du brevet.

ANNEXE 1 : ALGORITHME DE FLASHAGE

Introduction

5

La présente annexe définit un algorithme de flashage visant à optimiser le conditionnement de la matrice A en cherchant à écarter au maximum les dits flashes et à les distribuer de la façon la plus homogène possible dans l'espace colorimétrique de mesure, tout en restant dans les gamuts de la source et du capteur électronique d'image et tout en s'assurant que l'illuminant extérieur reste constant au cours des flashes.

10

Description de l'algorithme de flashage

15

Ledit algorithme prend en entrée un nombre de flashes N valides demandés.

20

Ledit algorithme renvoie en sortie une séquence de N flashes valides (avec pour chaque flash, les paramètres d'entrée de la source et les paramètres de sortie du capteur. L'indice de cette séquence est noté i (flash_i).

25

Ledit algorithme interagit avec le procédé et le dispositif selon l'invention qui émettent des flashes de couleurs vers un objet cible et qui captent la lumière réfléchie avec un capteur électronique d'image (entre autres, un smartphone avec l'écran qui émet les flashes et la caméra de visioconférence qui capte la lumière réfléchie par l'objet-cible).

Ledit algorithme fonctionne en présence d'un illuminant extérieur $I^{\text{ext}}(\lambda)$.

30

L'algorithme se décompose en 4 grandes « phases », et chaque phase en « étapes » :

- Phase 1 : émission d'un flash « noir 1 »
- Phase 2 : recherche des 3 sommets qui maximisent le « triangle de flashage »

- Phase 3 : complétion homogène du nombre de flashes valides demandés
- Phase 4 : émission d'un flash « noir 2 »

Notation : dans les lignes qui suivent, les coordonnées (dispR%, dispG%,
5 dispB%) désignent les paramètres d'entrée de chrominance de la source des
flashes de couleurs en pourcentage ([0;1]). DispBL% désigne le paramètre
d'entrée de luminance de la source des flashes de couleurs en pourcentage
([0 ;1]). Dans la pratique, ce sont des valeurs binaires, variant généralement
entre 0 et 255. (dispECMY, dispECMx, dispECMy) désignent les coordonnées
10 du flux lumineux émis par la source dans l'espace colorimétrique Yxy^{EC_mesure} .

Notation : dans les lignes qui suivent, les coordonnées (camR%_k,
camG%_k, camB%_k) désignent les paramètres de sortie de chrominance du
capteur électronique d'image en pourcentage ([0;1]). Dans la pratique, ce sont
15 des valeurs binaires, variant généralement entre 0 et 255. camBv désigne la
Brightness Value qui est le paramètre de sortie de luminance du capteur
électronique d'image(cf. standard EXIF). (camECMX, camECMY, camECMZ) et
(camECMY, camECMx, camECMy) désignent les coordonnées du flux
lumineux émis par la source respectivement dans l'espace colorimétrique
20 XYZ^{EC_mesure} et dans son diagramme de chromaticité.

Notation : dans les lignes qui suivent, les valeurs dispEps et camEps
signifient que les valeurs de seuil au-deçà desquelles les valeurs d'entrée de la
source et de sortie du capteur sont considérées comme nulles.

25

Phase 1 : Emission d'un flash « noir 1 »

L'objectif de la phase 1 est double : contrôler que l'illuminant extérieur est
compatible avec les limites physiques du dispositif et contrôler que l'illuminant
30 extérieur est constant au cours du flashage.

L'algorithme émet un flash « noir », c'est-à-dire qu'il procède à une
mesure avec la source éteinte, i.e. dispR%=dispG%=dispB%=0 (et dispBL=0 si
possible).

L'algorithme est confronté à 2 cas possibles :

- 5 - Cas 1 : La valeur $camECMY$ est strictement supérieure à une limite $camECMY_IEmax$ définie en fonction de la luminance maximale de la source des flashes de couleurs, ce qui signifie que la luminance de l'illuminant extérieur est trop forte par rapport aux limites physiques de la source des flashes de couleurs. La mesure n'est pas possible. L'algorithme interrompt le processus de flashage en générant un code-erreur ;
- 10 - Cas 2 : La valeur $camECMY$ est inférieure ou égale à une limite $camECMY_IEmax$ définie en fonction de la luminance maximale de la source des flashes de couleurs, ce qui signifie que la luminance de l'illuminant extérieur est compatible avec les limites physiques de la source des flashes de couleurs. L'algorithme stocke en mémoire les valeurs de chrominance et de luminance mesurées par le capteur d'images couleurs afin de s'assurer que l'illuminant reste constant au cours du flashage, puis l'algorithme passe à l'étape 1 de la phase 2.

20 Nota : dans la présente annexe 1, il n'est mentionné que 2 flashes noirs pour contrôler la constance de l'illuminant extérieur, un premier au début du flashage et un second à la fin. En fonction des conditions d'emploi du dispositif selon l'invention, il est tout à fait possible de réduire ou d'augmenter le nombre de flashes noirs pour contrôler la constance de l'illuminant extérieur.

25 **Phase 2 : Recherche des 3 sommets qui maximisent le « triangle de flashage »**

L'objectif de la phase 2 est de construire un « sous-gamut de flashage » de taille maximale pour une précision donnée, en restant compatible avec le gamut de la source des flashes lumineux et celui du capteur électronique d'images.

Définissons la fonction $f:(\text{dispECMx}, \text{dispECMy}) \rightarrow (\text{camECMx}, \text{camECMy})$ du gamut de la source des flashes de couleurs vers le gamut du capteur électronique d'images.

- 5 Le « sous-gamut source-capteur » est défini comme étant l'intersection du gamut du capteur et de l'image par f du gamut de la source. Le sous-gamut source est défini comme étant l'image réciproque par f du sous-gamut capteur.

- 10 Autrement dit, l'objectif de la phase 2 est de déterminer un triangle inclus dans le « sous-gamut capteur-source » de taille maximale pour une précision donnée. Ce triangle est appelé « triangle de flashage ».

Etape 1 : Recherche d'un pivot

- 15 L'objet de l'étape 1 est de définir un flash-pivot à l'intérieur du gamut capteur.

- L'algorithme va à l'étape 1.1 en utilisant une valeur pré-définie de flash-pivot pour l'itération $k=1$, par exemple un flash blanc de luminance maximale
20 ($\text{dispR\%}_1 = \text{dispG\%}_1 = \text{dispB\%}_1 = \text{dispBL\%}_1 = 1$).

Etape 1.1 : Essai d'un flash-pivot k

- 25 L'objet de l'étape 1.1 est de tester si le flash-pivot proposé d'indice k est à l'intérieur du gamut capteur.

- L'algorithme demande à la source de générer le flash-pivot k et il récupère
30 les coordonnées de sortie du capteur ($\text{camR\%}_k, \text{camG\%}_k, \text{camB\%}_k, \text{camBv}_k$).

L'algorithme est confronté à 2 cas possibles :

- Cas 1.1-1 : Au moins une des composantes ($\text{camR\%}_k$, $\text{camG\%}_k$, $\text{camB\%}_k$) est inférieure ou égale à camEps , ce qui signifie que le flash est en dehors du gamut du capteur. L'algorithme va à l'étape #1.2
- Cas 1.1-2 : Toutes les composantes ($\text{camR\%}_k$, $\text{camG\%}_k$, $\text{camB\%}_k$) sont strictement supérieure à camEps , ce qui signifie que le flash est à l'intérieur du gamut du capteur. L'algorithme va à l'étape 2

Etape 1.2 : Génération d'un nouveau flash-pivot d'indice k+1

L'objet de l'étape 1.2 est de générer un nouveau flash-pivot d'indice k+1 à l'intérieur du gamut capteur contrairement au flash-pivot précédent d'indice k.

L'algorithme est confronté à 2 cas possibles en fonction de ($\text{camR\%}_k$, $\text{camG\%}_k$, $\text{camB\%}_k$) :

- Cas 1.2-1 : Une seule des trois composantes ($\text{camR\%}_k$, $\text{camG\%}_k$, $\text{camB\%}_k$) est nulle avec le flash-pivot k. L'algorithme va essayer alors un nouveau flash-pivot (k+1) avec une proportion plus importante de la composante qui s'est annulée. A titre d'illustration, si $\text{camR\%}_k < \text{camEps}$, $\text{dispR\%}_{k+1} = \alpha * \text{dispR\%}_k$, $\text{dispG\%}_{k+1} = \text{dispG\%}_k * (1 - \alpha * \text{dispR\%}_k) / (\text{dispG\%}_k + \text{dispB\%}_k)$, $\text{dispB\%}_{k+1} = \text{dispB\%}_k * (1 - \alpha * \text{dispR\%}_k) / (\text{dispG\%}_k + \text{dispB\%}_k)$ avec $1 < \alpha < 1/\text{dispR\%}_k$. L'algorithme va à l'étape 1.1 avec ce flash-pivot k+1
- Cas 1.2-2 : Deux des trois composantes sont nulles ($\text{camR\%}_k$, $\text{camG\%}_k$, $\text{camB\%}_k$). L'algorithme va essayer alors un nouveau flash-pivot (k+1) avec une proportion plus importante des deux composantes qui se sont annulées. A titre d'illustration, si $\text{camR\%}_k < \text{camEps}$ et $\text{camG\%}_k < \text{camEps}$, $\text{dispR\%}_{k+1} = \alpha * \text{dispR\%}_k$, $\text{dispG\%}_{k+1} = \beta * \text{dispG\%}_k$, $\text{dispB\%}_{k+1} = 1 - \alpha * \text{dispR\%}_k - \beta * \text{dispG\%}_k$, avec $\alpha > 1$, $\beta > 1$ et $\alpha * \text{dispR\%}_k + \beta * \text{dispG\%}_k < 1$. L'algorithme va à l'étape 1.1 avec ce flash-pivot k+1

- Cas 1.2-3 : l'algorithme ne peut pas trouver de nouveau flash pivot $k+1$. Alors l'algorithme déclare la mesure impossible et sort de l'algorithme en renvoyant un code-erreur.

5 **Etape 2 : Raccourci pour passer du flash-pivot à un premier triangle de flashage de grande taille**

L'objet de l'étape 2 est d'économiser des flashes pour faire grandir la taille du triangle de flashage autour du flash-pivot.

10

Pour ce faire, l'algorithme dispose d'une base de données avec en entrée des valeurs d'entrée et de sortie de flashes de référence et en sortie les coordonnées des triangles de flashage associés. Cette base de données est donc un raccourci pour faire grandir le triangle de flashage.

15

Plus précisément, l'algorithme encadre le flash-pivot avec les 3 flashes de référence les plus proches (au sens d'une norme euclidienne dans l'espace de mesure). Puis il mixe les coordonnées des triangles de flashage de référence en utilisant les coordonnées barycentriques du flash-pivot dans le triangle des 3
20 flashes de référence. L'algorithme obtient de la sorte un triangle de flashage de grande taille autour du flash-pivot. Il opère ensuite une homothétie de rapport $K < 1$ sur ce triangle par rapport au flash-pivot pour prendre une marge de sécurité et il demande à la source d'émettre les 3 flashes de couleur correspondant aux 3 sommets dudit triangle. L'algorithme va ensuite à l'étape
25 4.1 pour analyser les résultats.

30

Si l'algorithme n'est pas capable d'encadrer le flash-pivot avec 3 flashes de référence, il sélectionne le flash de référence le plus proche de la base de données (si ce dernier est suffisamment proche par rapport à un seuil paramétrable) puis il fait émettre les 3 flashes comme précédemment et il va à l'étape 4.

S'il n'existe aucun flash de référence suffisamment proche dans la base de données, l'algorithme passe à l'étape 3.

Etape 3 : Passage du flash-pivot à un premier triangle de flashage de petite taille

5 L'objet de l'étape 3 est de créer un premier triangle de flashage de petite taille grâce à trois points, le premier étant la sortie capteur pour le flash-pivot (camR%_k, camG%_k, camB%_k).

10 L'algorithme ordonne les valeurs (camR%_k, camG%_k, camB%_k), puis génère deux nouveaux flashes, le premier comportant plus (en proportion) de la composante la plus faible, le deuxième comportant plus des deux composantes les plus faibles.

15 A titre d'illustration, si $\text{camG\%}_k < \text{camR\%}_k < \text{camB\%}_k$, l'algorithme émet un premier flash comportant plus (en proportion) de composante verte, puis un deuxième flash comportant plus de composante verte et plus de composante rouge.

Etape 3.1 : Essai du triangle de flashage de petite taille

20

L'objet de l'étape 3.1 est de tester si le triangle de flashage de petite taille est inclus dans le gamut capteur.

L'algorithme est confronté à 3 cas possibles :

- 25
- Cas 3.1-1 : au moins un flash sort du gamut capteur. L'algorithme va à l'étape 3.2.
 - Cas 3.1-2 : les sorties capteur pour ces flashes sont alignés avec la sortie capteur pour le flash-pivot. L'algorithme déclare la mesure impossible et sort de l'algorithme en renvoyant un code-erreur.
 - 30 - Cas 3.1-3 : le triangle de flashage de petite taille est inclus dans le gamut capteur et les points ne sont pas alignés. L'algorithme va à l'étape 4.

Etape 3.2 : Génération d'un nouveau triangle de flashage de petite taille

5 L'objet de l'étape 3.2 est de générer un nouveau triangle de flashage de petite taille en remplaçant les flashes dont la sortie capteur est sortie du gamut capteur.

10 L'algorithme remplace le (ou les) flash(s) qui a (ont) échoué en ajoutant moins des composantes ajoutées. L'algorithme va à l'étape 3.1 avec cette nouvelle base.

Etape 4 : Maximisation de la taille du triangle de flashage

15 L'objet de l'étape 4 est de construire le triangle de flashage de taille maximale pour une précision donnée.

20 La transformation f est supposée linéaire et l'algorithme détermine cette transformation grâce aux données des 3 points de la base du gamut capteur. L'algorithme en déduit le sous-gamut source-capteur puis détermine le triangle de surface maximale inclus dans ce sous-gamut. Il opère ensuite une homothétie de rapport $K < 1$ sur ce triangle par rapport au flash-pivot pour prendre une marge de sécurité et il demande à la source d'émettre les 3 flashes de couleur correspondant aux 3 sommets dudit triangle. L'algorithme va ensuite à l'étape 4.1 pour analyser les résultats.

25

Etape 4.1 : Essai d'un triangle de flashage d'ordre k

30 L'objet de l'étape 4.1 est de tester si le triangle de flashage est inclus dans le gamut capteur.

L'algorithme est confronté à 2 cas possibles :

- Cas 4.1-1 : un sommet du triangle de flashage sort du gamut capteur. L'algorithme va à l'étape 4.2.

- Cas 4.1-2 : le triangle de flashage est considéré comme insuffisamment grand, car au moins un de ses sommets est trop éloigné du sommet dugamut capteur le plus proche (au sens de la norme euclidienne dans l'espace de mesure), et le flash correspondant à ce sommet est également trop éloigné du sommet du gamut source le plus proche. L'algorithme va à l'étape 4.3.
- Cas 4.1-3 : le triangle de flashage est satisfaisant. L'algorithme passe à la phase 3.

Etape 4.2 : Génération d'un nouveau sommet d'indice k+1 du triangle de flashage suite à une sortie du gamut capteur du sommet d'indice k

L'objet de l'étape 4.2 est de générer un nouveau sommet d'indice k+1 du triangle de flashage à l'intérieur du gamut capteur contrairement au sommet d'indice k et de coordonnées (camR%_k, camG%_k, camB%_k).

L'algorithme est confronté à 2 cas possibles en fonction de (camR%_k, camG%_k, camB%_k) :

- Cas 4.2-1 : Une seule des trois composantes (camR%_k, camG%_k, camB%_k) est nulle. L'algorithme va essayer alors un nouveau flash-pivot (k+1) avec une proportion plus importante de la composante qui s'est annulée. A titre d'illustration, si $\text{camR\%}_k < \text{camEps}$, $\text{dispR\%}_{k+1} = \alpha * \text{dispR\%}_k$, $\text{dispG\%}_{k+1} = \text{dispG\%}_k * (1 - \alpha * \text{dispR\%}_k) / (\text{dispG\%}_k + \text{dispB\%}_k)$, $\text{dispB\%}_{k+1} = \text{dispB\%}_k * (1 - \alpha * \text{dispR\%}_k) / (\text{dispG\%}_k + \text{dispB\%}_k)$ avec $1 < \alpha < 1 / \text{dispR\%}_k$. L'algorithme va à l'étape 1.1 avec ce flash-pivot k+1.
- Cas 4.2-2 : Deux des trois composantes sont nulles (camR%_k, camG%_k, camB%_k). L'algorithme va essayer alors un nouveau flash-pivot (k+1) avec une proportion plus importante des deux composantes qui se sont annulées. A titre d'illustration, si $\text{camR\%}_k < \text{camEps}$ et $\text{camG\%}_k < \text{camEps}$, $\text{dispR\%}_{k+1} = \alpha * \text{dispR\%}_k$, $\text{dispG\%}_{k+1} = \beta * \text{dispG\%}_k$, $\text{dispB\%}_{k+1} = 1 - \alpha * \text{dispR\%}_k - \beta * \text{dispG\%}_k$, avec $\alpha > 1$, β

> 1 et $\alpha \cdot \text{dispR\%}_k + \beta \cdot \text{dispG\%}_k < 1$. L'algorithme va à l'étape 1.1 avec ce flash-pivot $k+1$.

- Cas 4.2-3 : l'algorithme ne peut pas trouver de nouveau flash pivot $k+1$. Alors l'algorithme déclare la mesure impossible et sort de l'algorithme en renvoyant un code-erreur.

Etape 4.3 : Génération d'un nouveau sommet du triangle de flashage car triangle de flashage de taille insuffisante

L'objet de l'étape 4.3 est d'agrandir le triangle de flashage car au moins un de ses sommets est trop éloigné du sommet du gamut capteur le plus proche et le flash flash_k_1 correspondant à ce sommet est également trop éloigné du sommet du gamut source le plus proche.

On note flash_k_2 et flash_k_3 les deux flashes dont les sorties capteur sont les deux autres sommets du triangle de flashage.

L'algorithme génère deux flashes respectivement barycentre du système $\{(\text{flash } \text{flash_k_1}, \alpha), (\text{flash } \text{flash_k_2}, 1-\alpha)\}$ et barycentre du système $\{(\text{flash } \text{flash_k_1}, \alpha), (\text{flash } \text{flash_k_3}, 1-\alpha)\}$ (par ex : $\alpha = 0.2$). Ces deux flashes et le flash flash_k_1 forment un triangle sur lequel la transformation f est supposée affine. L'algorithme détermine cette transformation grâce aux données des trois points et en déduit le sous-gamut source-capteur puis détermine le sommet qui permet d'obtenir le triangle de flashage de surface maximale inclus dans ce sous-gamut. Il opère ensuite une homothétie de rapport $K < 1$ sur ce point par rapport au sommet précédent pour prendre une marge de sécurité et il demande à la source d'émettre le flash de couleur correspondant au dit point. Si la sortie capteur sort du gamut capteur, l'algorithme réitère l'opération avec une marge supérieure (K plus petit), sinon, la sortie capteur remplace le sommet précédent et forme avec les autres sommets un nouveau triangle de flashage. L'algorithme va à l'étape 4.1 avec ce nouveau triangle de flashage.

Phase 3 : Complétion homogène du nombre de flashes valides demandés

5 L'objectif de la phase 3 est de générer une séquence de N flashes dont les sorties capteur sont répartis de façon homogène dans le triangle de flashage défini lors de la phase 2.

10 L'algorithme dispose donc des coordonnées des sommets du triangle de flashage ainsi que d'un certain nombre de flashes intermédiaires qui ont permis de déterminer le triangle de flashage lors de la phase 2 (au moins un : le flash-pivot). Ces points sont notés (camECMx_k, camECMy_k).

Etape 1 : Génération d'une grille de N points dans le triangle de flashage

L'objet de l'étape 1 est de générer une grille de N points répartis de façon homogène dans le triangle de flashage.

20 L'algorithme génère une grille de N points répartis comme décrit sur les figures 4 à 8 pour des valeurs de N allant de 1 à 15.

L'algorithme va à l'étape 2 avec cette grille de N points dans le triangle de flashage, notés (camECMx_g_k, camECMy_g_k).

25

Etape 2 : Génération d'un flash

L'objet de l'étape 2 est de générer des flashes dont la sortie capteur se rapproche des points idéaux situés sur la grille défini lors de l'étape 1.

30

Pour chaque point (camECMx_g_k, camECMy_g_k), l'algorithme détermine le triangle de sommets trois points non alignés (camECMx_k, camECMy_k) qui minimise la somme des carrés des

distances du point (camECMx_g_k, camECMy_g_k) aux sommets du triangle. Cette somme est appelée distance au triangle.

5 L'algorithme choisit le point (camECMx_g_k, camECMy_g_k) dont la distance à son triangle est la plus petite.

La transformation f est supposée linéaire sur ce triangle et son voisinage, et on la détermine grâce aux données des 3 sommets du triangle. L'algorithme détermine ainsi le flash (dispECMx_g_k, dispECMy_g_k) dont la
10 sortie capteur sera (camECMx_g_k, camECMy_g_k).

Si la sortie capteur pour le flash (dispECMx_g_k, dispECMy_g_k) sort du gamut capteur, le flash n'est pas retenu.

15 Le point (camECMx_g_k, camECMy_g_k) est supprimé de la liste des points à approcher.

L'algorithme est confronté à 2 cas possibles :

- Cas 2-1 : il ne reste plus aucun point (camECMx_g_k, camECMy_g_k) à
20 approcher. L'algorithme va à l'étape #3 avec l'ensemble des flashes qui ont été générés au cours de phase 2 et 3.
- Cas 2-2 : il reste encore au moins un point (camECMx_g_k, camECMy_g_k) à approcher. L'algorithme va à l'étape 2 avec la nouvelle liste de points (camECMx_g_k, camECMy_g_k).

25

Etape 3 : Choix des flashes à retourner

L'algorithme retient que les flashes dont la sortie capteur est suffisamment proche d'un point de la grille générée à l'étape 1 (au sens de la
30 distance euclidienne dans l'espace colorimétrique de mesure). Si deux points sont suffisamment proches d'un point de la grille, alors n'est retenu que le point le plus proche. L'algorithme passe ensuite à la phase 4.

Nota : si au moins un flash dont la sortie capteur est strictement incluse dans le gamut capteur est retenu, alors la condition $\sum_{i=1}^N (S^{\text{source}}(\lambda)_i) > 0$ sur l'intervalle $[\lambda_1^{\text{mesure}}, \lambda_2^{\text{mesure}}]$ utilisée dans la démonstration de l'inversibilité de $A^T A$ en annexe 2 est vérifiée.

5

Phase 4 : Emission d'un flash « noir 2 »

L'objectif de la phase 4 est de contrôler que l'illuminant extérieur est constant au cours du flashage.

10

L'algorithme émet un flash « noir », c'est-à-dire qu'il procède à une mesure avec la source éteinte, i.e. $\text{dispR}\% = \text{dispG}\% = \text{dispB}\% = 0$ (et $\text{dispBL} = 0$ si possible).

15

L'algorithme est confronté à 2 cas possibles :

- Cas 1 : La différence des valeurs de chrominance et de luminance mesurées par le capteur d'images couleurs entre le flash noir courant et le flash noir précédent est strictement supérieure à un seuil donné. Cela signifie que l'illuminant extérieur a varié au cours des flashes.

20

L'algorithme interrompt le processus de flashage en générant un code-erreur ;

- Cas 2 : La différence des valeurs de chrominance et de luminance mesurées par le capteur d'images couleurs entre le flash noir courant et le flash noir précédent est inférieure ou égale à un seuil donné. Cela signifie que l'illuminant extérieur n'a pas varié au cours des flashes et donc que le processus de flashage est valide. L'algorithme renvoie la séquence des N flashes valides réalisés avec, pour chaque flash, les paramètres d'entrée de la source et les paramètres de sortie du capteur.

25

ANNEXE 2 : DEMONSTRATION DE L'INVERSIBILITE DE $A^T A$

5 On montre que $A^T A$ est inversible dans le cas où $\sum_{i=1}^N (S^{\text{source}}(\lambda_i) - S^{\text{ext}}(\lambda_i)) > 0$ sur l'intervalle $[\lambda_1^{\text{mesure}}, \lambda_2^{\text{mesure}}]$ (les flashes recouvrent l'ensemble des longueurs d'onde considérées pour déterminer $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ et $I^{\text{ext}}(\lambda)$), et pour $h = \max(\lambda_{i+1} - \lambda_i)$ suffisamment petit.

10 Soit x un vecteur propre associé à la valeur propre μ

On a d'une part $(A^T A x, x) = (\mu x, x) = \mu (x, x) = \mu \|x\|^2$

Et d'autre part $(A^T A x, x) = (A x, A x) = \|A x\|^2$

Donc $\mu = \|A x\|^2 / \|x\|^2$

Donc μ est positive et elle l'est strictement si A est injective.

15 Donc si A est injective, toutes les valeurs propres de $A^T A$ sont strictement positives, donc $A^T A$ est inversible.

Réciproquement, si A n'est pas injective, il existe x non nul tel que $A x = 0$. On a alors $A^T A x = 0$ donc $A^T A$ n'est pas inversible.

Finalement, $A^T A$ est inversible si et seulement si A est injective.

20

Lemme 1 : l'intégrale d'une spline $S(\lambda)$ cubique scellée à pentes nulles aux extrémités $\int S(\lambda) d\lambda$ est toujours positive quand tous les y_i sont positifs

25 Cas n°1: si tous les $y_i = 0$,

Alors $s(\lambda) = 0$ pour tous les λ en raison des pentes nulles aux bords, d'où $\int S(\lambda) d\lambda = 0$

Cas n°2: s'il existe un $y_i > 0$ et que tous les autres y_i sont nuls:

30 y_i crée un "ventre positif" sur $[\lambda_{i-1}; \lambda_i] \cup [\lambda_i; \lambda_{i+1}]$ (aire > 0) et des "ventres négatifs" sur $[\lambda_{i-2}; \lambda_{i-1}]$ et $[\lambda_{i+1}; \lambda_{i+2}]$ (aire < 0), et ainsi de suite jusqu'aux bords.

Comme la fonction spline minimise l'énergie de la languette, la surface du ventre positif $[\lambda_{i-1}; \lambda_i] \cup [\lambda_i; \lambda_{i+1}]$ est supérieure à celles des ventres négatifs

$[\lambda_{i-2}; \lambda_{i-1}]$ et $[\lambda_{i+1}; \lambda_{i+2}]$. C'est dû au fait que $|p_{i+1}| > |p_{i+2}| > \dots > |p_n| = 0$ et que $|p_{i-1}| > |p_{i-2}| > \dots > |p_0| = 0$. Du coup, la surface des ventres positifs est plus grande que les ventres négatifs et donc $\int S(\lambda) * d\lambda > 0$

5 Cas n°3: s'il existe deux $y_i > 0$:

Cas n°3.1: y_i et $y_{i+1} > 0$ (contigus) : Cela crée un "gros" ventre positif. Le raisonnement du cas n°2 est applicable

10 Cas n°3.2: y_i et $y_{i+2} > 0$ ($y_{i+1} = 0$): on a 2 ventres positifs contigus. Le raisonnement du cas n°2 est applicable

Cas n°3.3: y_i et $y_{i+3} > 0$ ($y_{i+1} = y_{i+2}$): on 1 ventre positif, 1 ventre négatif, 1 ventre positif. Le raisonnement du cas n°2 est applicable

15 Cas n°3.4: y_i et $y_{i+k} > 0$ avec $k > 3$. Idem cas n°3.3

Cas n°4: s'il existe au moins 3 $y_i > 0$ (cas général)
Alors le raisonnement des cas n°3 est applicable. CQFD

20

Lemme 2 : l'intégrale d'une spline $S(\lambda)$ cubique scellée à pentes nulles aux extrémités multipliée par une fonction $K(\lambda) > 0$ ($\int S(\lambda) * K(\lambda) * d\lambda$) est toujours positive quand tous les y_i sont positifs

25

Le lemme 1 (cas n°2) n'est pas applicable directement car le terme $K(\lambda)$ peut diminuer fortement l'aire des ventres positifs et augmenter celle des ventres négatifs.

30 L'astuce consiste à augmenter le nombre de points d'interpolation pour diminuer la surface des ventres négatifs.

Replaçons-nous dans le cas n°2 du lemme 1. L'erreur d'une spline scellée est bornée par la formule suivante : $|f(x)-s(x)| \leq a \cdot h^4$ avec $a = 5/384 \cdot \max[a; b] \cdot \{ |f(4)(E)| \} > 0$ (valeur constante) et $h = \max\{|x_i - x_{i-1}|\}$.

5

C'est-à-dire que: $f(x) - a \cdot h \leq s(x) \leq f(x) + a \cdot h$

Comme $f(x) \geq 0$ ($R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ et $I^{\text{EXT}}(\lambda)$ sont des flux d'énergie), $s(x) \geq -a \cdot h$, donc la surface maximale des ventres négatifs $[\lambda_{i-2}; \lambda_{i-1}] \cup [\lambda_{i+1}; \lambda_{i+2}]$ est égale à $-2 \cdot a \cdot h^2$.

10

La surface des ventres positifs reste constante car l'augmentation du nombre de points d'interpolation va créer plusieurs $y_i > 0$ contigus.

15 Par conséquent, il existe un h pour lequel la surface des ventres positifs est strictement supérieure à celle des ventres négatifs.

Retour à la démonstration

20 Soit x tel que $A \cdot x = 0$ avec x formé des les ordonnées des splines cubiques scellées à pentes nulles aux extrémités représentant $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ et $I^{\text{ext}}(\lambda)$.

Montrons que $x=0$

25 On a pour tout $i=1, \dots, N$ et pour toute sensibilité $x/y/z(\lambda)$:

$\int R^{\text{OBJ}}(\lambda) \cdot S^{\text{source}}(\lambda)_i \cdot x/y/z(\lambda) \cdot d\lambda + \int I^{\text{ext}}(\lambda) \cdot x/y/z(\lambda) \cdot d\lambda = 0$, où $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ et $I^{\text{ext}}(\lambda)$ sont les fonctions splines cubiques scellées à pentes nulles aux extrémités.

30 En sommant pour les $3 \cdot N$ équations, on obtient :

$$\int R^{\text{OBJ}}(\lambda) \cdot \sum_{i=1}^N S^{\text{source}}(\lambda)_i \cdot (x(\lambda) + y(\lambda) + z(\lambda)) \cdot d\lambda + \int I^{\text{ext}}(\lambda) \cdot (x(\lambda) + y(\lambda) + z(\lambda)) \cdot d\lambda = 0$$

Avec $x(\lambda)+y(\lambda)+z(\lambda) > 0$ et $\sum_{i=1}^N (S^{\text{source}}(\lambda)_i) > 0$ pour tout λ , on déduit du lemme 2 qu'il existe un h suffisamment petit tel que :

$$\int R^{\text{OBJ}}(\lambda) * \sum_{i=1}^N (S^{\text{source}}(\lambda)_i) * (x(\lambda)+y(\lambda)+z(\lambda)) * d\lambda = 0 \text{ et}$$

$$\int I^{\text{ext}}(\lambda) * (x(\lambda)+y(\lambda)+z(\lambda)) * d\lambda = 0$$

5

Puisque $R^{\text{OBJ}}(\lambda) = 0$ et $I^{\text{ext}}(\lambda) = 0$ pour tout λ ,

i.e. $x = 0$. A est injective. Donc $A^T * A$ est inversible. CQFD

10

REVENDEICATIONS

1. Procédé de mesure de la réflectance diffuse uniforme $R^{OBJ}(\lambda)$ en au moins un point d'un objet (30) à l'aide d'un dispositif (10) comportant un moyen (11) apte à émettre des illuminants de couleur exprimés sous la forme de flux lumineux et un capteur électronique d'images couleurs (12), caractérisé en ce qu'il comporte les étapes suivantes :
- placement dudit objet (30) dans une zone se trouvant en face de et sensiblement perpendiculairement audit moyen (11) apte à émettre des illuminants de couleur sous la forme de flux lumineux de couleurs et se trouvant dans le champ de vision dudit capteur électronique d'images couleurs (12), ledit objet (30) étant également soumis à un illuminant extérieur sous la forme d'un flux lumineux extérieur environnant (40) $I^{ext}(\lambda)$ inconnu et constant où λ désigne la longueur d'onde, émission par ledit moyen (11) d'une série de N illuminants $S^{source}(\lambda)_i$ (avec N entier naturel supérieur à un, i variant de 1 à N et λ la longueur d'onde), $S^{source}(\lambda)_i$ étant connu en fonction des paramètres d'entrée dudit moyen (11) apte à émettre des flux lumineux de couleurs, capture par ledit capteur électronique d'images couleurs (12) du flux lumineux réfléchi en au moins un point dudit objet (30) et entrant dans le capteur, ledit flux lumineux étant noté $E^{capteur}(\lambda)_i$, avec N entier naturel strictement supérieur à deux, i variant de 1 à N et λ la longueur d'onde, et obtention de N équations « E_i » : $E^{capteur}(\lambda)_i = R^{OBJ}(\lambda) * (I^{ext}(\lambda) + S^{source}(\lambda)_i)$, en raison du caractère additif de la lumière ondulatoire et par définition de la réflectance diffuse uniforme $R^{OBJ}(\lambda)$ en au moins un point de l'objet (30) ; et
 - détermination par ledit dispositif (10) des deux fonctions inconnues continues $R^{OBJ}(\lambda)$ et $I^{ext}(\lambda)$ en résolvant le système des N équations E_i :
 - en intégrant chaque équation E_i sur l'intersection des spectres source et capteur, en notant x, y et z les

sensibilités dans la base colorimétrique choisie, chaque équation E_i générant alors trois équations « E_i intégrée » :

:

$$\begin{aligned} & \int (E^{\text{capteur}}(\lambda)_i * x(\lambda) * d\lambda) - \int ((R^{\text{OBJ}}(\lambda) * (I^{\text{ext}}(\lambda) + S^{\text{source}}(\lambda)_i)) * x(\lambda) * d\lambda) \\ 5 \quad & \int (E^{\text{capteur}}(\lambda)_i * y(\lambda) * d\lambda) - \int ((R^{\text{OBJ}}(\lambda) * (I^{\text{ext}}(\lambda) + S^{\text{source}}(\lambda)_i)) * y(\lambda) * d\lambda) \\ & \int (E^{\text{capteur}}(\lambda)_i * z(\lambda) * d\lambda) - \int ((R^{\text{OBJ}}(\lambda) * (I^{\text{ext}}(\lambda) + S^{\text{source}}(\lambda)_i)) * z(\lambda) * d\lambda), \end{aligned}$$

- en calculant la valeur numérique correspondant au terme de gauche des équations E_i intégrée à l'aide des paramètres de sortie du capteur numérique d'image ; et
- 10 - en exprimant les deux fonctions inconnues continues $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ et $I^{\text{ext}}(\lambda)$ à l'aide d'un nombre fini de points d'interpolation (λ_j, y_j) reliés par au moins une fonction d'interpolation $s(\lambda)$ pour conserver le caractère continu desdites fonctions inconnues continues $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ et $I^{\text{ext}}(\lambda)$,
15 les λ_j étant des longueurs d'onde choisies dans l'intersection des spectres source et capteur et étant des paramètres d'entrée du procédé, choisis pour minimiser le nombre de points d'interpolation à précision donnée ; et
- 20 - en recherchant les paramètres y_j des fonctions $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ et $I^{\text{ext}}(\lambda)$ qui minimisent le système de moindres carrés $\|A * X - B\|_2$ résultant des équations E_i intégrées.

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comporte en outre une étape de détermination de la valeur de l'illuminant extérieur
25 $I^{\text{ext}}(\lambda)$.
3. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comporte en outre une étape de transcription de la fonction $R^{\text{OBJ}}(\lambda)$ de réflectance diffuse uniforme en au moins un point de l'objet (30) en coordonnées CIE XYZ pour un illuminant donné.
- 30 4. Procédé selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que le nombre de flashes est du même ordre de grandeur que le nombre de points

d'interpolation pour déterminer les valeurs de la réflectance diffuse uniforme $R^{OBJ}(\lambda)$ en au moins un point de l'objet (30) et de l'illuminant extérieur $I^{ext}(\lambda)$.

- 5 5. Procédé selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce qu'il comporte une étape de détermination des valeurs de la réflectance diffuse uniforme $R^{OBJ}(\lambda)$ en au moins un point de l'objet (30) et de l'illuminant extérieur $I^{ext}(\lambda)$ dans plusieurs bandes spectrales.
- 10 6. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit dispositif (10) met en œuvre un écran pour émettre les flashes de couleur et un capteur électronique d'image pour capter la lumière réfléchie par l'objet-cible.
7. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit dispositif (10) est un appareil photo ou une caméra avec flash intégré ou amovible.
- 15 8. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit dispositif (10) met en œuvre des guides d'onde pour faire transiter l'émission et la réception des flashes de couleurs.
9. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il est mis en œuvre pour réaliser des photographies spectrométriques d'objet et pour réaliser des adaptations chromatiques (balance des blancs) à volonté.
- 20 10. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il est mis en œuvre pour mesurer la couleur d'un élément compris dans le groupe suivant : matériaux, solides, liquides, gaz, peintures, tapisseries, graphismes, textiles, plastiques, bois, métaux, sols, minéraux, végétaux et aliments.
- 25 11. Procédé selon l'une des revendications 1 à 9, caractérisé en ce qu'il est mis en œuvre pour la mesure des couleurs à but médical ou cosmétique sur l'homme et le vivant d'au moins un élément compris

dans le groupe suivant : peau, boutons, grains de beauté, chevelure, pelage, maquillage, et dents.

12. Procédé selon l'une des revendications 1 à 9, caractérisé en ce qu'il est mis en œuvre pour l'utilisation de codes-barres en couleur, à une ou plusieurs dimensions.

13. Procédé selon l'une des revendications 1 à 9, caractérisé en ce qu'il est mis en œuvre dans un but d'assistance aux personnes daltoniennes et/ou aveugles.

14. Dispositif (10) comportant un moyen (11) apte à émettre des illuminants de couleur sous la forme de flux lumineux de couleurs et un capteur électronique d'images couleurs (12), de mesure de la réflectance diffuse uniforme $R^{OBJ}(\lambda)$ en au moins un point d'un objet (30) placé dans une zone se trouvant en face de et sensiblement perpendiculairement audit moyen (11) apte à émettre des couleurs et se trouvant dans le champ de vision dudit capteur électronique d'images couleurs (12) et étant soumis à un illuminant extérieur sous la forme d'un flux lumineux extérieur environnant (40) noté $I^{ext}(\lambda)$, constant et inconnu, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens pour :

- émettre une série de N illuminants $S^{source}(\lambda)_i$ (avec N entier naturel strictement supérieur à deux, i variant de 1 à N et λ la longueur d'onde), $S^{source}(\lambda)_i$ étant connu en fonction des paramètres d'entrée dudit moyen (11) apte à émettre des flux lumineux de couleurs, capture par ledit capteur électronique d'image couleur (12) du flux lumineux réfléchi en au moins un point dudit objet (30) et entrant dans le capteur, ledit flux lumineux étant noté $E^{capteur}(\lambda)_i$, avec N entier naturel supérieur à un, i variant de 1 à N et λ la longueur d'onde, et obtention de N équations $(E_i) : E^{capteur}(\lambda)_i = R^{OBJ}(\lambda) * (I^{ext}(\lambda) + S^{source}(\lambda)_i)$ en raison du caractère additif de la lumière ondulatoire et par définition de la réflectance diffuse uniforme $R^{OBJ}(\lambda)$ en au moins un point de l'objet (30), ; et

- déterminer les deux fonctions inconnues continues $R^{OBJ}(\lambda)$ et $I^{ext}(\lambda)$ en résolvant le système des N équations E_i :

5

- en intégrant chaque équation E_i sur l'intersection des spectres source et capteur, en notant x, y et z les sensibilités dans la base colorimétrique choisie, chaque équation E_i générant alors trois équations « E_i intégrée » :

$$\int (E^{capteur}(\lambda)_i * x(\lambda) * d\lambda) - \int ((R^{OBJ}(\lambda) * (I^{ext}(\lambda) + S^{source}(\lambda)_i)) * x(\lambda) * d\lambda)$$

$$\int (E^{capteur}(\lambda)_i * y(\lambda) * d\lambda) - \int ((R^{OBJ}(\lambda) * (I^{ext}(\lambda) + S^{source}(\lambda)_i)) * y(\lambda) * d\lambda)$$

$$\int (E^{capteur}(\lambda)_i * z(\lambda) * d\lambda) - \int ((R^{OBJ}(\lambda) * (I^{ext}(\lambda) + S^{source}(\lambda)_i)) * z(\lambda) * d\lambda),$$

10

- en calculant la valeur numérique correspondant au terme de gauche des équations E_i intégrée à l'aide des paramètres de sortie du capteur numérique d'image ; et

15

- en exprimant les deux fonctions inconnues continues $R^{OBJ}(\lambda)$ et $I^{ext}(\lambda)$ à l'aide d'un nombre fini de points d'interpolation (λ_j, y_j) reliés par au moins une fonction d'interpolation $s(\lambda)$ pour conserver le caractère continu desdites fonctions inconnues continues $R^{OBJ}(\lambda)$ et $I^{ext}(\lambda)$, les λ_j étant des longueurs d'onde choisies dans l'intersection des spectres source et capteur et étant des paramètres d'entrée du procédé, choisis pour minimiser le nombre de points d'interpolation à précision donnée ; et

20

- en recherchant les paramètres y_j des courbes $R^{OBJ}(\lambda)$ et $I^{ext}(\lambda)$ qui minimisent le système de moindres carrés $\|A * X - B\|_2$ résultant des équations E_i intégrées.

25