

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
COURBEVOIE

①1 N° de publication : **3 078 852**  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)  
②1 N° d'enregistrement national : **18 51978**

⑤1 Int Cl<sup>8</sup> : **H 04 N 5/30** (2018.01), **G 06 F 16/50**, **G 06 T 11/00**,  
**H 04 N 1/56**, **5/217**

①2 **DEMANDE DE BREVET D'INVENTION**

**A1**

②2 Date de dépôt : 07.03.18.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la  
demande : 13.09.19 Bulletin 19/37.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : *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 (CNRS) — FR.*

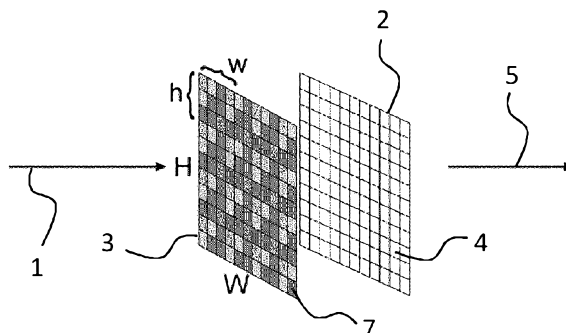
⑦2 Inventeur(s) : ALLEYSSON DAVID et AMBA  
PRAKHAR.

⑦3 Titulaire(s) : CENTRE NATIONAL DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS).

⑦4 Mandataire(s) : IPAZ.

⑤4 **PROCEDE DE RECONSTRUCTION D'UNE IMAGE COULEUR ACQUISE PAR UN CAPTEUR RECOUVERT  
D'UNE MOSAÏQUE DE FILTRES COULEURS.**

⑤7 La présente invention concerne un procédé de re-  
construction d'une image couleur, acquise par un capteur  
photosensible 2 recouvert d'une mosaïque de filtres 3 de dif-  
férentes couleurs composant un motif de base 6, réalisant  
le produit d'une matrice de démosaïçage avec une repré-  
sentation matricielle d'une image mosaïque 5 provenant du  
capteur 2 après acquisition de l'image couleur par ledit cap-  
teur 2, ledit produit de la matrice de démosaïçage avec la re-  
présentation matricielle de l'image mosaïque mettant en œu-  
vre une interpolation de la couleur de chaque pixel de  
l'image mosaïque 5 en fonction d'un voisinage de pixels  
d'un motif de base 43 correspondant au motif de base 6 de  
la mosaïque de filtres 3.



FR 3 078 852 - A1



5 Procédé de reconstruction d'une image couleur acquise par un capteur re-  
couvert d'une mosaïque de filtres couleurs

### **Domaine technique**

10 L'invention se situe dans le domaine du traitement d'images acquises  
par une caméra mono-capteur. Plus particulièrement l'invention concerne la  
reconstruction d'images couleurs après leur acquisition par un capteur re-  
couvert par un filtre composé d'une mosaïque de filtres de plusieurs cou-  
leurs.

15

### **Etat de la technique**

De manière générale, une caméra comprend au moins un objectif  
composé d'un ou plusieurs composants optiques tels des lentilles. L'objectif  
20 de la caméra dirige la lumière captée vers un capteur composé de cellules  
photosensibles. Sur le capteur, un ou plusieurs filtres de couleurs sont ap-  
pliqués afin de permettre la reconstitution du spectre de la lumière reçue  
par le capteur.

Une caméra peut en outre comprendre sur le chemin optique entre  
25 l'objectif et le capteur un ou tous les composants parmi : un filtre qui coupe  
l'infrarouge (IRcut), un filtre optique spatial passe-bas (OLP), des micros-  
lentilles chargées de focaliser la lumière vers chaque cellule du capteur.

Une caméra peut être un appareil photographique ou tout autre  
moyen apte à capter une image et disposant d'un capteur photosensible  
30 muni d'une matrice de filtres de couleur, appelée mosaïque.

Le principe général de l'acquisition d'une image couleur 1 par un pre-  
mier capteur photosensible 2 à travers une première mosaïque de filtres 3  
est représenté sur la figure 1a. La première mosaïque de filtres 3 donne à  
chaque pixel 4 du premier capteur 2 une sensibilité spectrale différente pour  
35 permettre une représentation fidèle de la couleur sur l'image rendue.  
Chaque pixel 4 du premier capteur 2 représente un photosite du premier  
capteur 2. Chaque photosite est une cellule photoélectrique sensible à l'in-

5    tensité lumineuse, dans une certaine gamme de longueur d'onde, qu'il traduit en produisant un faible courant électrique relatif à sa sensibilité spectrale.

          La figure 1a montre un exemple d'une matrice de filtres composée d'une première mosaïque de filtres 3 de couleurs différentes. L'exemple re-  
10    présente une première matrice de filtres 3 de taille  $H \times W$  comprenant six filtres de couleurs différentes agencés selon un premier motif de base 6 dont un exemple est présenté sur la figure 1b. Le premier motif de base 6, de dimensions  $h \times w$ , est répété de façon à couvrir l'ensemble de la première mosaïque de filtres 3 sans qu'il y ait de recouvrement entre deux motifs de  
15    base.

          L'image couleur acquise 5 est une image à  $P$  composantes de couleurs, c'est-à-dire à  $P$  couleurs. Les  $P$  composantes de couleurs sont, dans l'exemple représenté sur la figure 1b, les couleurs de six filtres F1, F2, F3, F4, F5, F6. Les six filtres F1, F2, F3, F4, F5, F6 sont agencés dans le premier  
20    motif de base 6 de taille  $3 \times 3$ . La lumière véhiculant l'image couleur à acquérir 1 passe au travers de la première matrice de filtres 3 avant d'arriver sur le premier capteur 2 présenté sur la figure 1a sous la forme d'une matrice de pixels. La première matrice de filtres 3 est agencée pour couvrir entièrement le premier capteur 2 de taille  $H \times W$ .

25    La reconstruction d'une image après son acquisition par le premier capteur 2 recouvert de la première mosaïque de filtres 3 utilise un procédé dit de démosaïçage ou dématricage. Chaque pixel 4 étant recouvert d'un filtre d'une couleur particulière une seule couleur se trouve échantillonnée par pixel. Il est donc nécessaire de mettre en place un procédé pour reconstruire la composition en couleurs de la lumière reçue par chaque pixel 4. À  
30    cette fin, un procédé de démosaïçage est mis en œuvre. Le procédé de démosaïçage consiste notamment en une interpolation des chrominances des différents pixels 4. Le procédé de démosaïçage utilise une matrice de démosaïçage appliquée sur l'image brute 5 produite par le premier capteur 2. Par  
35    image brute 5 on entend les données sortant directement du premier capteur 2 après acquisition de l'image couleur 1.

          La construction d'une matrice de démosaïçage est réalisée au cours d'un processus d'apprentissage utilisant une base de données d'images de

5 référence. La base de données d'images de référence peut comprendre  $N$   
images de références  $I_i, i \in [1, \dots, N]$  à  $P$  composantes. A partir de la base de  
données d'images de référence, on construit une nouvelle base de données  
de  $N$  images simulées  $J_i$ . À chaque image de référence  $I_i$  correspond une  
image simulée  $J_i$ . Les images simulées  $J_i$  représentent une modélisation des  
10 images brutes 5 produites par le premier capteur 2 après acquisition des  
images de la base de données d'images de référence par ledit premier cap-  
teur 2. Les images simulées  $J_i$  sont obtenues en partant des images de ré-  
férences  $I_i$  et en supprimant de celles-ci les composantes de couleur qui ne  
sont pas mesurées par le premier capteur 2. En pratique, si l'image de ré-  
15 fférence  $I_i$  possède  $P$  composantes, dans l'image simulée  $J_i$  on garde unique-  
ment la composante du filtre positionné sur chaque pixel du premier capteur  
2. L'image simulée  $J_i$  comprend alors un unique plan. Les images simulées  
 $J_i$  des images brutes 5 issues du premier capteur 2 sont nommées par la  
suite images mosaïque 5, et les images  $I_i$  provenant de la base de données  
20 de référence sont nommées images résolues.

La figure 2a représente un exemple d'une transformation d'une image  
mosaïque  $J_i$  en une matrice de vecteurs  $x$ . La figure 2b représente un  
exemple d'une transformation d'une image résolue  $I_i$  en une matrice de vec-  
teurs  $y$  représentant l'image couleur. L'image mosaïque  $J_i$  est composée, tel  
25 que représenté sur la figure 2a, d'un ensemble de motifs de base de taille  
 $h \times w$ . La matrice de vecteurs  $x$  de l'image mosaïque  $J_i$  comprend  $HW/(hw)$   
vecteurs de taille  $hw$ . L'image résolue  $I_i$  comprend  $P$  composantes, chaque  
composante correspondant à l'une des  $P$  couleurs. Chaque composante de  
l'image résolue  $I_i$  est une image d'une taille équivalente à la taille  $H \times W$  de  
30 la première mosaïque de filtres 3. Chaque composante de l'image résolue  $I_i$   
peut être découpée selon un motif dont la taille est équivalente à la taille du  
premier motif de base 6 de la première mosaïque de filtres 3 :  $h \times w$ . Il est  
ainsi possible de définir une matrice de vecteurs  $y$  représentant une image  
résolue  $I_i$ , construite avec  $HW/(hw)$  vecteurs de taille  $Phw$ .

35 Le modèle de calcul de l'image mosaïque  $J_i$  à partir de l'image résolue  
 $I_i$  peut s'exprimer ainsi :

$$x = My \quad (1000)$$

avec  $M$  une matrice de taille  $hw \times Phw$ .

5           La figure 2c représente un exemple d'une matrice  $M$  créée pour un  
filtre réalisé à partir d'un deuxième motif de base 20 d'une matrice de Bayer  
de taille  $2 \times 2$  comprenant les filtres des couleurs suivantes : un premier  
filtre rouge 21, un deuxième filtre vert 22, un troisième filtre vert 23 et un  
quatrième filtre bleu 24. La matrice  $M$  obtenue pour ce motif est donc de  
10           taille  $4 \times 12$ . La matrice  $M$  est composée de « 0 » et de « 1 ». Chaque com-  
posante de la matrice  $M$  ayant la valeur « 1 » représente une cellule du  
deuxième motif de base 20 de la matrice de Bayer. Pour obtenir le démo-  
saïçage, il est connu de l'état de la technique d'utiliser une matrice dite de  
démosaïçage  $D$  définie par la méthode des moindres carrées, appliquée à  
15           l'ensemble des matrices de vecteurs  $(x ; y)$  représentant respectivement les  
images mosaïques  $J_i$  et les images résolues  $I_i$ . La matrice de démosaïçage  $D$   
ne peut être obtenue en inversant simplement la matrice  $M$ . En effet, même  
si une inversion de la matrice  $M$  peut être réalisée en utilisant une méthode  
du type pseudo inverse, cette opération produit une matrice  $D$  donnant de  
20           mauvais résultats dans le procédé de démosaïçage.

La matrice de démosaïçage  $D$  peut donc être calculée de la manière sui-  
vante :

$$D = E^{i=1..N} \{yx^T (xx^T)^{-1}\} \quad (1001)$$

$E^{i=1..N}$  représentant l'espérance mathématique sur les  $N$  images de la base  
25           de données de référence comparées avec les  $N$  images de la base de don-  
nées des images simulées. La matrice de démosaïçage  $D$  ainsi calculée est  
de taille  $Phw \times hw$ .

À partir de la matrice de démosaïçage  $D$  calculée, il est possible de  
déterminer une matrice de vecteurs  $\tilde{y}$  qui est une estimation de l'image re-  
30           construite d'après l'image mosaïque issue du premier capteur 2.

$$\tilde{y} = Dx \quad (1002)$$

Ensuite, pour reconstruire l'image couleur à  $P$  composantes, il suffit  
de transformer la matrice de vecteurs  $\tilde{y}$  en une image à  $P$  composantes,  
chaque composante correspondant à l'une des  $P$  couleurs, cette transforma-  
35           tion est l'opération inverse de l'opération représentée sur la figure 2b.  
Chaque composante est ainsi une image d'une taille correspondant à la taille  
 $H \times W$  de l'image mosaïque.

5 Un des problèmes de cette méthode de reconstruction d'images couleur est que l'image à reconstruire est de taille supérieure à la taille de l'image couleur captée 1. Le modèle utilisé pour la reconstruction d'images réalise alors une interpolation de  $P$  couleurs pour un pixel à partir d'une seule information de couleur, celle du pixel. Il en résulte une grande instabilité de la matrice  $D$  ainsi calculée et donc une mauvaise qualité de reconstruction de l'image couleur.

L'état de la technique propose de réaliser une interpolation à partir d'un voisinage de chaque pixel de la matrice mosaïque afin d'en déterminer la couleur. Une telle interpolation permet de renforcer la stabilité de l'estimation de la matrice de démosaïçage  $D$ . Il a été proposé dans les demandes de brevet FR2959092 et FR2917559 d'utiliser, pour réaliser cette interpolation, un voisinage dit glissant tel que représenté sur la figure 2d. La figure 2d représente une partie d'une matrice mosaïque produite par un deuxième capteur. Le motif de base de taille  $h \times w$  utilisé pour l'exemple représenté sur la figure 2d est un quatrième motif de base 25 de taille  $2 \times 2$  d'une mosaïque de Bayer. Le quatrième motif de base 25 comprend quatre pixels de couleur différentes : rouge 26, vert 27 et bleu 28. Pour simplifier la représentation, un des pixels du quatrième motif de base 25 est laissé blanc. Chaque pixel 26, 27, 28 possède son propre voisinage de pixels de taille  $3 \times 3$  dont il est le centre. Par exemple le premier pixel rouge 26 est au centre d'un premier voisinage de pixels 200 ; le deuxième pixel 27 vert est au centre d'un deuxième voisinage 201 ; le troisième pixel 28 bleu est au centre d'un troisième voisinage 202. Le deuxième pixel 27 est situé sur la même colonne mais dans la ligne inférieure par rapport au premier pixel 26. Ainsi le deuxième voisinage 201 est une translation d'un pixel vers le bas du premier voisinage 200. Le troisième pixel 28 est situé sur la même ligne mais dans la colonne à droite par rapport au premier pixel 26. Ainsi le troisième voisinage 202 est une translation d'un pixel vers la droite du premier voisinage 200. Tous les pixels d'un même motif de base ont donc un voisinage différent. Lors du passage d'un motif de base à un autre motif de base sur la matrice mosaïque, le voisinage de chaque pixel « suit » le pixel dans sa translation d'un motif à l'autre.

5 Lors de la reconstitution de l'image, la couleur de chaque pixel peut donc être reconstituée en fonction des couleurs des pixels de son voisinage. Ainsi, la matrice  $D$  est définie en intégrant les voisinages de chaque pixel de la manière suivante : dans la construction des matrices de vecteurs  $x, y$  chaque pixel est augmenté de son voisinage et donc les différents voisinages  
10 de chaque pixel sont également stockés dans les matrices de vecteurs  $x, y$ . La prise en compte des voisinages dans le calcul des matrices de démosaïçage, si elle permet d'avoir une meilleure reconstitution de l'image, possède l'inconvénient de devoir manipuler des matrices plus grandes et donc nécessite des moyens de calculs et de stockage de données importants.

15

### **Résumé de l'invention**

Un objectif de l'invention est notamment de proposer une amélioration des méthodes connues de calcul d'une matrice de démosaïçage. Un  
20 autre objectif de l'invention est d'utiliser cette amélioration afin de proposer une optimisation des mosaïques de filtres associées aux capteurs.

La présente invention propose à cette fin un procédé de reconstruction d'une image couleur, acquise par un capteur photosensible de taille  $H \times W$ , recouvert d'une mosaïque, de taille  $H \times W$ , de  $P$  filtres de différentes  
25 couleurs composant un motif de base de taille  $h \times w$  tel que  $h < H$  et  $w < W$ . Ledit motif de base de la mosaïque de filtres se répète de façon à couvrir la mosaïque de filtres sans recouvrement entre les motifs de base. Ledit procédé est mis en œuvre par ordinateur. Ledit procédé comprend au moins les  
30 étapes suivantes :

- une première étape préalable de construction d'une matrice de démosaïçage  $D$  à partir d'une simulation utilisant une première base de données de  $N$  images  $I_i, i \in [1, \dots, N]$ , à  $P$  composantes de couleurs, dites images de référence, pour produire une deuxième base de données de  $N$  images  $J_i, i \in [1, \dots, N]$  simulant des images rendues issues  
35 du capteur, après acquisition par ledit capteur des images de la première base de données, lesdites images de référence  $I_i$  et rendues  $J_i$

5 étant respectivement représentées sous la forme de matrices de  $HW/(hw)$  vecteurs  $y_1, x_1$  tels que :

- les composantes de  $y_1$  sont les  $P$  composantes d'un voisinage réduit de taille  $n_h \times n_w$  d'un des  $HW/(hw)$  motifs de base appliqué à l'image de référence  $I_i$ ,
- 10 - les composantes de  $x_1$  sont les composantes d'un voisinage réduit de taille  $n_h \times n_w$  de l'un des  $HW/(hw)$  motifs de base appliqué à l'image rendue  $J_i$ , avec  $n_h > h$  et  $n_w > w$  ;
- une deuxième étape de reconstruction d'une image couleur réalisant le produit de la matrice de démosaïçage  $D$  avec une représentation matricielle d'une image mosaïque provenant du capteur après acquisition de l'image couleur par ledit capteur, ledit produit de la matrice de démosaïçage  $D$  avec la représentation matricielle de l'image mosaïque mettant en œuvre une interpolation de la couleur de chaque pixel de l'image mosaïque en fonction d'un voisinage, de taille  $n_h \times n_w$  pixels, d'un motif de base de taille  $h \times w$ , correspondant au motif de base de la mosaïque de filtres.

20 Avantageusement la taille du voisinage peut être définie par  $n_h n_w = Phw$ .

Une première matrice de démosaïçage  $D_1$  peut s'exprimer comme une espérance mathématique  $E$  calculée sur les  $N$  images de référence de la première base de données :  $D_1 = E^{i=1..N} \{y x_1^T (x_1 x_1^T)^{-1}\}$ , avec  $y$  une matrice de  $HW/(hw)$  vecteurs de taille  $Phw$  représentant l'image couleur.

La première matrice de démosaïçage  $D_1$  peut s'exprimer ainsi :  $D_1 = S_1 R M_1^T (M_1 R M_1^T)^{-1}$  avec  $x_1 = M_1 y_1$ ,  $M_1$  étant une matrice de projection de  $y_1$  sur  $x_1$ ,  $y = S_1 y_1$ ,  $S_1$  étant une matrice de réduction du voisinage du vecteur  $y_1$  et de transformation du vecteur  $y_1$  en  $y$ , et  $R = \frac{1}{NPHW} E^{i=1..N} \{y_1 y_1^T\}$  étant une matrice de corrélation des images résolues de la première base de données exprimées en fonction des voisinages réduits de taille  $n_h \times n_w$ .

La matrice de démosaïçage peut s'exprimer en fonction de la sensibilité spectrale du capteur et des fonctions spectrales des  $P$  filtres de couleurs différentes.

5 La première base de données pouvant alternativement comprendre des images multi-spectrales de réflectance, une deuxième matrice de démosaïçage  $D_2$  peut être définie par l'expression :

$$D_2 = F^T C L S_1 R' L_1^T C_1^T F_1 M_1^T (M_1 F_1^T C_1 L_1 R' L_1^T C_1^T F_1 M_1^T)^{-1},$$

avec  $R' = \frac{1}{NHWP_\lambda} E^{i=1..N} \{z_1 z_1^T\},$

10 La deuxième matrice de démosaïçage  $D_2$  peut être construite selon les étapes suivantes :

- calcul d'une matrice de vecteurs  $y_0$  représentant une image à  $P$  composantes en fonction d'une matrice de vecteurs  $z_0$  représentant une image multi-spectrale de réflectance obtenue à partir d'une réflexion d'un objet éclairé par une source de lumière de densité spectrale de puissance  $L(\lambda)$ ,  $\lambda$  étant une composante spectrale, tel que :  $y_0 = F_0^T C_0 L_0 z_0$ , avec  $F_0$  une matrice de taille  $P_\lambda \times P$  de fonctions de transmission spectrale des filtres de la mosaïque, avec  $C_0$  une matrice diagonale de taille  $P_\lambda \times P_\lambda$  d'une sensibilité spectrale du capteur,  $L_0$  une matrice diagonale de taille  $P_\lambda \times P_\lambda$  des densités spectrales de puissance de la source de lumière ;
- construction de la matrice de vecteurs  $y$  à partir de l'image multi-composantes et d'une matrice de vecteurs  $z$ , construite à partir de l'image multi-spectrale de réflectance, lesdites matrices de vecteurs  $y$  et  $z$  comprenant ledit motif de base, tels que  $y = F^T C L z$  avec  $F = I_{hw} \otimes F_0$ ,  $I_{hw}$  étant une matrice identité de dimensions  $hw \times hw$ ,  $C = I_{hw} \otimes C_0$ , et  $L = I_{hw} \otimes L_0$  ;
- construction d'une matrice de vecteurs  $z_1$  composée des voisinages réduits de taille  $n_h \times n_w$  du motif de base de l'image de multi-spectrale de réflectance telle que  $y_1 = F_1^T C_1 L_1 z_1$ ,  $y_1$  étant une matrice composée des voisinages réduits de taille  $n_h \times n_w$  du motif de base de taille  $h \times w$  de l'image spectrale multi-spectrale de réflectance, avec  $F_1 = I_{n_h n_w} \otimes F_0$ ,  $I_{n_h n_w}$  étant une matrice identité de dimensions  $n_h n_w \times n_h n_w$ ,  $L_1 = I_{n_h n_w} \otimes L_0$ , et  $C_1 = I_{n_h n_w} \otimes C_0$  ;
- construction de la deuxième matrice de démosaïçage  $D_2$  avec  $M_1$  étant une matrice de projection de  $y_1$  sur  $x_1$  et  $S_1$  étant une matrice de réduction du voisinage du vecteur  $y_1$  et de transformation en  $y$ .

5  $C_0$  peut également être un produit des sensibilités spectrales de composants du chemin optique de la caméra par la sensibilité spectrale du capteur, lesdits composants pouvant comprendre au moins l'un parmi : un objectif de la caméra, un filtre infrarouge, un filtre spatial passe-bas, un système de micros-lentilles.

10 Chaque ligne de la matrice de démosaïage  $D$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  peut s'exprimer comme un filtre de convolution.

L'invention concerne également un système de traitement de données comprenant des moyens de mise en œuvre des étapes du procédé de reconstruction d'une image couleur.

15 L'invention concerne également un produit programme d'ordinateur comprenant des instructions qui lorsque le programme est exécuté par un ordinateur, conduisent l'ordinateur à mettre en œuvre les étapes du procédé de reconstruction d'une image couleur.

20 Un autre aspect de l'invention est qu'elle peut s'appliquer à un procédé d'optimisation de fonctions spectrales de filtres et d'arrangement des filtres sur une mosaïque de  $P$  filtres de couleurs différentes, répétés de manière à remplir un motif de base de taille  $h \times w$ , ledit motif de base se répétant de façon à couvrir la mosaïque de filtres, ladite mosaïque de filtres étant  
25 appliquée sur un capteur photosensible. Ledit procédé comprend une optimisation multicritères par minimisation d'une erreur de restitution colorimétrique et par minimisation d'une erreur quadratique moyenne entre une image provenant d'un capteur idéal, acquise à partir d'une image d'une base de données d'images de référence, et une image provenant d'un capteur  
30 recouvert de la mosaïque de  $P$  filtres différents, acquise à partir de la même image de la base de données d'images de référence, ladite image acquise par le capteur recouvert de la mosaïque de filtres étant reconstruite par le procédé de reconstruction d'une image couleur.

35 Le procédé d'optimisation comprend en outre une minimisation d'une erreur de restitution colorimétrique entre l'image provenant du capteur idéal acquise à partir de l'image de la base de données d'images, et une image provenant d'un capteur recouvert d'une série de  $P$  filtres, chacun des  $P$  filtres

5 recouvrant la totalité du capteur, ladite image étant acquise à partir de la même image de la base de donnée.

Le procédé d'optimisation comprend en outre une minimisation d'une erreur de restitution colorimétrique entre une mire de MacBeth acquise par un capteur parfait et une mire de MacBeth acquise par un capteur muni de  
10 la mosaïque des  $P$  filtres.

L'invention concerne également un système de traitement de données comprenant des moyens de mise en œuvre des étapes du procédé d'optimisation.

L'invention concerne en outre un produit programme d'ordinateur  
15 comprenant des instructions qui lorsque le programme est exécuté par un ordinateur, conduisent l'ordinateur à mettre en œuvre les étapes du procédé d'optimisation.

Avantageusement, l'invention permet d'améliorer la vitesse d'exécution de l'algorithme de démosaïçage ainsi que l'encombrement de la mémoire d'un calculateur utilisé dans le cadre de la mise en œuvre de l'invention.

### Description des figures

25 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 1a représente un principe général d'acquisition d'une  
30 image par un capteur muni d'une mosaïque de filtres ;
- La figure 1b représente un exemple d'un motif de base pour une mosaïque de filtres ;
- La figure 2a représente une conversion d'une image issue d'un capteur muni d'une mosaïque de filtres, en une matrice de vecteurs ;
- 35 - La figure 2b représente une conversion d'une image à plusieurs composantes en une matrice de vecteurs ;

- 5 - La figure 2c représente un exemple de matrice de calcul d'une image en sortie d'un capteur muni d'une mosaïque de filtres de Bayer ;
- La figure 2d représente un exemple d'interpolation d'une couleur d'un pixel en utilisant un voisinage glissant selon l'état de la technique ;
- 10 - La figure 3 représente un exemple d'interpolation d'une couleur d'un pixel en utilisant un voisinage selon l'invention ;
- La figure 4a représente une conversion d'une image mosaïque en sortie d'un capteur, en une matrice de vecteurs ;
- 15 - La figure 4b représente une conversion d'une image multi-composantes en une matrice de vecteurs ;
- La figure 5 représente un exemple d'acquisition de données pour le calcul d'une matrice de démosaïçage sur un domaine spectral continu ;
- 20 - La figure 6a représente des conversions d'une image multi-spectrale en plusieurs matrices de vecteurs différentes ;
- La figure 6b représente un calcul d'une matrice de vecteurs représentant une image rendue après acquisition d'une image multi-spectrale par un capteur associé à un filtre ;
- 25 - La figure 7 représente un principe de transformation d'une matrice de démosaïçage en filtres de convolution ;
- La figure 8 représente un exemple d'acquisition de données pour une optimisation des dispositions et des fonctions spectrales des filtres d'une mosaïque de filtres ;
- 30 - La figure 9 représente des calculs de différentes images utilisées pour optimiser les dispositions et les fonctions spectrales des filtres de la mosaïque de filtres ;
- La figure 10 représente le procédé et dispositif de démosaïçage selon l'invention ;
- 35 - La figure 11 représente le procédé de construction d'une matrice de démosaïçage selon l'invention.

5 **Description détaillée**

La présente invention traite notamment de l'acquisition d'une image multi-chromatique ou multi-composantes couleur de taille  $H \times W$ . Sur la figure 1a, l'image comprend  $P$  composantes de couleurs. L'image à  $P$  composantes de couleur 1 est acquise par un premier capteur photosensible 2 après passage de la lumière provenant d'un objet au travers d'une première mosaïque de filtres 3, ou matrice, composée de filtres 7 de  $P$  couleurs différentes. Ladite mosaïque de filtres 3 est de taille  $H \times W$ . Le premier capteur 15 2 est défini par une matrice de pixels 4 de taille  $H \times W$ . Chaque filtre 7 est de la taille d'un pixel 4 du premier capteur 2 et recouvre un pixel 4 du premier capteur 2. La mosaïque 3 de filtres de couleurs 7 est composée à partir du premier motif de base 6 de taille  $h \times w$  avec  $hw \geq P$ . Le premier motif de base 6 comprend  $h \times w$  couleurs différentes ou non. Par exemple sur la figure 20 1b, le premier motif de base 6 comprend deux filtres rouge F1, deux filtres orange F2, deux filtres vert F3, un filtre rose F4, un filtre bleu F5 et un filtre jaune F6. Les filtres F1, F2, F3, F4, F5, F6 du premier motif de base 6 sont disposés selon un agencement particulier. Dans l'exemple représenté sur la figure 1b, le premier motif de base 6 se présente sous la forme d'une matrice 25 de  $3 \times 3$  de filtres disposés de la façon suivante, de gauche à droite et de haut en bas : F3, F1, F2, F4, F5, F3, F1, F6, F2. Dans la matrice ou mosaïque 3 de filtres couleurs, le premier motif de base 6 se répète de manière à couvrir l'ensemble de la mosaïque 3 sans recouvrement entre les différents motifs de base 6. La taille du premier motif de base 6 est définie de manière 30 à ce que  $H$  soit un multiple de  $h$  et  $W$  un multiple de  $w$ . D'autres motifs de base peuvent être utilisés sans pour cela sortir du cadre de l'invention.

Une fois l'image acquise par le premier capteur 2, celle-ci est traitée afin de reconstruire l'image multi-composante. Le traitement réalisé sur l'image brute sortant du premier capteur 2, est un procédé de démosaïçage 35 utilisant une matrice de démosaïçage  $D_1$ . La matrice de démosaïçage  $D_1$  est obtenue par la méthode des moindres carrées appliquée aux matrices de vecteurs  $x_1, y$  :

$$D_1 = E^{i=1..N} \{ y x_1^T (x_1 x_1^T)^{-1} \} \quad (1003)$$

5 Dans l'expression (1003),  $y$  est une matrice de vecteurs telle que représentée sur la figure 2b. La matrice de vecteurs  $y$  est obtenue à partir d'une image résolue  $I_i$  à  $P$  composantes de couleurs faisant partie d'une base de données d'images de référence utilisée pour la construction de la matrice  $D_1$  par apprentissage tel que décrit dans l'état de la technique.  
10 L'image résolue  $I_i$  est de dimensions  $H \times W$  et comprend un troisième motif de base 21 de taille  $h \times w$ . La matrice de vecteurs  $y$  est construite en prenant les  $P$  composantes d'un troisième motif de base 21, c'est-à-dire les  $P$  composantes de chaque pixel du troisième motif de base 21. Chaque vecteur de  $y$  est donc de taille  $Phw$  et  $y$  comprend  $HW/(hw)$  vecteurs de taille  $Phw$  pour  
15 représenter toutes les informations contenues dans une image  $I$  multi-composantes provenant de la base de données d'images de référence.

Dans l'ensemble de la description on utilise indifféremment  $H \times W$  pour la taille d'une matrice ou d'une image. Dans le cas d'une matrice,  $H \times W$  représente le nombre de lignes  $H$  par le nombre de colonnes  $W$  de la matrice. Dans le cas d'une image,  $H \times W$  représente la dimension de l'image correspondant à une matrice de taille  $H \times W$ . De la même manière, la taille du premier motif de base 6 est de  $h$  lignes par  $w$  colonnes. Dans une image, par extension, on définit une portion de l'image dont la taille correspond à la taille du premier motif de base 6 dans une matrice de même taille que  
20 l'image. On peut ainsi dire que le motif de base 6 est appliqué sur l'image. Par analogie, la portion d'image correspondant au motif de base, tel que le troisième motif de base 21 représenté sur la figure 2b, sera aussi nommée motif de base. La taille du motif de base de l'image est de la même dimension que le motif de base de la matrice. Par extension, on définit la taille du motif de base de l'image comme étant  $h \times w$ .  
30

Dans l'expression (1003),  $x_1$  est construit tel que représenté sur la figure 4a. À partir de la base de données d'images de référence, une simulation permet d'obtenir une nouvelle base de données d'images brutes  
40 contenant des données issues du premier capteur 2, simulées après acquisition des images de la base de données d'images de référence par le premier capteur 2. Les données issues du premier capteur 2 forment une image brute 40 de taille  $H \times W$  qui peut être décomposée en pixels 41, chaque pixel 41 correspondant à une réponse d'un photosite du premier  
35

5 capteur 2 par exemple, telle que représentée sur la figure 4a. L'image brute  
40 peut être représentée comme une matrice de taille  $H \times W$  comprenant  
le premier motif de base 6 correspondant au motif de base de la mosaïque  
3 de filtres 7 telle que représentée sur la figure 1a. Sur l'exemple repré-  
senté sur la figure 4a, chaque pixel correspond à l'une des  $P$  composantes  
10 couleurs et donc à l'un des  $P$  filtres 7. Sur la figure 4a, les composantes du  
premier motif de base 6 sont notées  $F_1$  à  $F_p$ . Le premier motif de base 6 de  
l'image mosaïque 40 est donc de taille  $h \times w$ . Sur la figure 4a, le motif de  
base est pour l'exemple de taille  $3 \times 3$ . Selon l'invention, un quatrième voi-  
sinage de pixels 30 est défini par rapport au premier motif de base 6. Le  
15 quatrième voisinage 30 est de taille  $n_h \times n_w$ . Le quatrième voisinage 30  
selon l'invention est par la suite nommé voisinage réduit 30. La taille du  
voisinage réduit 30 est définie selon l'invention telle que  $n_h > h$  et  $n_w > w$ .  
On peut par exemple utiliser un voisinage réduit tel que  $n_h n_w = Phw$ . Avan-  
tageusement le voisinage réduit ainsi défini comprend une quantité et une  
20 qualité d'informations de couleurs optimales pour décrire l'image couleur  
captée 1.

La figure 3 représente une utilisation du voisinage réduit 30 selon  
l'invention pour réaliser les calculs d'interpolation des couleurs de chaque  
pixel de l'image mosaïque 40. Pour l'exemple, le motif de base utilisé est  
25 le quatrième motif de base 25 tel que représenté sur la figure 2d selon  
l'état de la technique. On définit ainsi un voisinage réduit 30 de taille  $4 \times 4$   
sur l'exemple représenté figure 3 autour du quatrième motif de base 25.  
Le voisinage réduit 30 a par exemple une taille d'un pixel en largeur et en  
longueur de plus que le quatrième motif de base 25. La couleur de chaque  
30 pixel du quatrième motif de base 25 est calculée en interpolant les couleurs  
des pixels du voisinage réduit 30. Lorsque l'on passe d'un quatrième motif  
de base 25 à un quatrième motif de base 25 voisin sur l'image mosaïque  
40, le voisinage réduit 30 est translaté sur l'image mosaïque 40 d'un  
nombre de pixels équivalent à la taille d'un côté du quatrième motif de  
35 base 25 soit dans l'exemple présent : deux pixels. Le voisinage 30 est dit  
réduit en ce qu'un seul et même voisinage est utilisé pour tous les pixels  
d'un même motif de base : ce même voisinage peut être défini comme le  
voisinage du motif de base.

5 De manière générale, le voisinage réduit 30 est défini tel que  $n_h > h$   
et  $n_w > w$ . Par exemple, on peut prendre  $n_h n_w = Phw$ .

Le même voisinage réduit 30 de taille  $n_h \times n_w$  selon l'invention est  
donc utilisé pour interpoler la couleur de chaque pixel du premier motif de  
base 6 lors de la reconstruction de l'image couleur captée 1 selon l'inven-  
10 tion. Ainsi, pour construire la matrice de démosaïçage on construit la ma-  
trice de vecteurs  $x_1$  tel que chaque vecteur comprend uniquement les com-  
posantes des voisinages réduits 30 de chaque premier motif de base 6  
composant l'image mosaïque 40. Chaque vecteur de  $x_1$  est donc de taille  
 $n_h n_w$  et la matrice  $x_1$  comprend  $HW/(hw)$  vecteurs de taille  $n_h n_w$ . Ainsi la  
15 matrice de démosaïçage  $D_1$  de l'expression (1003) est de taille  $Phw \times n_h n_w$ .  
Avantageusement, une telle matrice est de taille inférieure à une matrice  
selon l'état de la technique tout en conservant une bonne qualité dans la  
reconstruction d'une image couleur. Par exemple on peut montrer expéri-  
mentalement que l'image reconstruite avec un voisinage glissant de taille  
20  $n_h \times n_w$  possède les mêmes performances qu'un voisinage réduit de taille  
 $(n_h + h - 1) \times (n_w + w - 1)$ . D'un point de vue théorique les deux voisinages  
couvrent le même domaine de l'image mosaïque. Par exemple, pour un  
motif de base de Bayer de taille  $2 \times 2$  et un voisinage glissant de taille  $3 \times 3$   
on obtient les même résultats en terme de performances qu'avec un voi-  
25 sinage réduit de taille  $4 \times 4$ .

Il est également possible de définir une matrice de vecteurs  $y_1$ , telle  
que représentée sur la figure 4b. La matrice de vecteurs  $y_1$  représente  
l'image résolue à  $P$  composantes 42 sous la forme d'une matrice de  
 $HW/(hw)$  vecteurs de taille  $Pn_h n_w$  construite comme la matrice  $y$  mais en  
30 prenant le voisinage réduit 30 du premier motif de base 6 à la place du  
premier motif de base 6 pour chacune des  $P$  composantes de l'image ré-  
solue 42. Ainsi en définissant les opérateurs suivants, il est possible d'ob-  
tenir une version simplifiée de la matrice de démosaïçage  $D_1$ .

On définit une matrice  $M_1$  de projection de la matrice de vecteurs  $y_1$   
35 de l'image résolue à  $P$  composantes munie de son voisinage réduit 30 sur  
la matrice de vecteurs  $x_1$  de l'image mosaïque 40 munie de son voisinage  
réduit 30, telle que :

$$x_1 = M_1 y_1 \quad (1004)$$

5 On définit une matrice  $S_1$  de réduction du voisinage réduit 30 de la matrice de vecteurs  $y_1$  pour la transformer en la matrice de vecteurs  $y$ , telle que :

$$y = S_1 y_1 \quad (1005)$$

Il est ainsi possible de définir la matrice de démosaïçage  $D_1$  comme  
10 suit :

$$D_1 = S_1 R M_1^T (M_1 R M_1^T)^{-1} \quad (1006)$$

avec  $R$  la matrice de corrélation telle que :

$$R = \frac{1}{NPHW} E^{i=1..N} \{y_1 y_1^T\} \quad (1007)$$

Avantageusement, en utilisant la formulation de  $D_1$  selon l'expres-  
15 sion (1006) il est possible de calculer une seule fois la matrice de corrélation  $R$  des images couleurs de la base de données d'images de référence, ou images résolues, lesdites images résolues étant munies de leur voisinage réduit 30 de taille  $n_h \times n_w$ . Ainsi il est possible de recalculer simplement la matrice de démosaïçage  $D_1$  en modifiant les opérateurs  $M_1$  et  $S_1$   
20 selon la mosaïque de filtres considérée.

Une estimation de l'erreur liée au procédé de démosaïçage peut s'exprimer ainsi :

$$e = E^{i=1..N} \{tr((\tilde{y} - y)(\tilde{y} - y)^T)\} \quad (1008)$$

donc

$$25 \quad e = tr\{D_1 M_1 R M_1^T D_1^T + S_1 R S_1^T - S_1 R M_1^T D_1^T - D_1 M_1 R S_1^T\} \quad (1009)$$

avec  $tr$ , l'opérateur trace.

Il est ainsi possible d'évaluer à priori une performance d'une mosaïque de filtres particulière pour encoder une base de données d'images de référence.

30 La base de données d'images de références permet de calculer  $R$  pour une taille de voisinage réduit  $n_h \times n_w$  donnée.

La définition du premier motif de base 6 de la mosaïque de filtres permet de calculer  $M_1$ ,  $S_1$ , et  $D_1$ .

À partir de ces données, l'erreur moyenne dans la reconstruction  
35 d'une image, liée à l'utilisation d'une mosaïque particulière positionnée sur le premier capteur 2, peut être calculée directement sur la base de données d'images de référence.

5 De la même manière, il est possible de calculer une moyenne d'un écart de couleurs entre les images de références et les images résolues de la manière décrite ci-après.

Une matrice contenant l'efficacité quantique spectrale des filtres est nommée  $F_{QE}$ . L'efficacité quantique spectrale peut être mesurée par un monochromateur, ou estimée par une transformation adéquate si l'on ne connaît pas à priori les fonctions de transmission spectrales des filtres. La mesure de l'efficacité quantique spectrale est réalisée en procédant à un enregistrement des données acquises par le premier capteur 2 à partir des images correspondant aux lumières quasi-chromatiques produites par le monochromateur pour chaque pixel du motif de base. Les niveaux des images sont ensuite arrangés de sorte à ce que les niveaux de sensibilités liés aux temps d'expositions lors de la mesure se correspondent, c'est-à-dire que l'on multiplie les niveaux des images par un facteur dépendant du temps d'exposition pour harmoniser les sensibilités dans une unité radiométrique donnée. Pour calculer une efficacité quantique des  $P$  différents pixels couverts par les  $P$  filtres différents sur un domaine de longueur d'onde donné avec un pas de longueur d'onde donné, on utilise un appareil de mesure de la transparence des filtres, ou de l'ensemble du chemin optique, sur  $N_\lambda$  intervalles de longueur d'onde. Par exemple pour un domaine de 380nm à 780nm avec un pas de 1nm, on obtient  $N_\lambda = 401$ .

Une transformée de l'espace des filtres vers l'espace de couleur trichromatique normalisé CIE 1931 - XYZ peut être définie de la façon suivante :

$$FtoXYZ = XYZ^T F_{QE} (F_{QE}^T F_{QE})^{-1} \quad (1010)$$

30 avec  $F_{QE}$  de taille  $N_\lambda \times P$ ,  $XYZ$  une matrice de taille  $N_\lambda \times 3$  contenant les fonctions spectrales des filtres définies pour l'espace couleur CIE 1931 - XYZ, et  $FtoXYZ$  de taille  $3 \times P$ .  $FtoXYZ$  est une matrice de transformation permettant de convertir une image couleur à  $P$  composantes en une image dont les coordonnées colorimétriques sont exprimées dans l'espace de couleurs CIE 1931 - XYZ. L'espace de couleurs CIE 1931 - XYZ a été défini par la commission internationale de l'éclairage (CIE) en 1931. En étendant la taille de la matrice de transformation  $FtoXYZ$  à la taille du vecteur  $y$ , on obtient la transformation  $y_{XYZ}$  définie par :

$$y_{XYZ} = (I_{hw} \otimes FtoXYZ)y \quad (1011)$$

dans laquelle  $I_{hw}$  est une matrice identité de taille  $hw \times hw$  et  $\otimes$  représente un produit de Kronecker.

Une approximation de la moyenne de l'écart de couleur au carré  $E^{i=1..N}\{\Delta E^2\}$  sur la base de données d'images de référence pour une mosaïque de filtres donnée et une taille de voisinage définie, est donnée par :

$$E^{i=1..N}\{\Delta E\} = \sqrt{\overline{\Delta E^2}} \quad (1012)$$

avec :

$$\begin{aligned} \overline{\Delta E^2} &= tr(K(\tilde{y} - y)(\tilde{y} - y)^T K^T) \\ &= tr\{KD_1 M_1 R M_1^T D_1^T K^T + KSR S^T K^T - KSR M_1^T D_1^T K^T - KD_1 M_1 R S^T K^T\} \end{aligned} \quad (1013),$$

$$K = I_{hw} \otimes J' \quad (1014),$$

$$J' = \left( \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 & 116 & 0 \\ 500 & -500 & 0 \\ 0 & 200 & -200 \end{bmatrix} FtoXYZ \right) \quad (1015)$$

$J'$  étant une approximation de la transformée vers l'espace de couleur CIE L\*a\*b\*.

Une représentation dans l'espace couleur CIE 1931 - XYZ est une représentation linéaire du système visuel. Or cette représentation n'est pas satisfaisante pour prédire les différences de couleurs. Pour cela on utilise donc l'espace couleur CIE L\*a\*b\* qui uniformise l'espace couleur pour s'approcher de la perception humaine. L'espace de couleur CIE L\*a\*b\* a été défini par la commission internationale de l'éclairage (CIE) en 1976.

Il est ainsi possible de tester et d'évaluer à moindre coût de calcul différentes mosaïques notamment du fait que le calcul de  $R$  est réalisé une seule fois avec le voisinage réduit 30 pour chaque image de la première base de données de référence, quelle que soit la mosaïque testée. Il est ainsi possible de calculer une erreur moyenne dans la reconstruction des images de la base de données de référence avec une mosaïque donnée.

5           Avantageusement, il est possible de transformer une image recons-  
truite par le procédé mosaïçage selon l'invention vers tout espace nor-  
malisé dérivé de l'espace de couleurs CIE 1931 – XYZ. On peut choisir par  
exemple un espace sRGB (signifiant standard Red Green Blue) qui est un  
espace colorimétrique trichromatique défini par la norme défini par la  
10 norme CIE 61966-2-1 (1999). Par exemple, une transformation vers l'es-  
pace couleur sRGB peut être réalisée de la manière suivante :

$$y_{sRGB} = A(I_{hw} \otimes FtoXYZ)\tilde{y} \quad (1016)$$

En utilisant l'expression (1002) appliquée à  $D_1$  et  $x_1$ , on obtient :

$$y_{sRGB} = A(I_{hw} \otimes FtoXYZ)D_1x_1 \quad (1017)$$

15           avec

$$A = I_{hw} \otimes \begin{bmatrix} 3.2406 & -1.5372 & -0.4986 \\ -0.9689 & 1.8758 & 0.0415 \\ 0.0557 & -0.2040 & 1.0570 \end{bmatrix} \quad (1018)$$

A étant une matrice de transformation de l'espace de couleurs CIE  
1931 – XYZ vers l'espace couleur sRGB.

20           La figure 5 représente une généralisation du calcul de la matrice de  
démosaïçage selon l'invention au domaine spectral tout entier, c'est-à-dire  
à un domaine spectral continu. La figure 5 représente une source de lu-  
mière 50 de densité spectrale de puissance  $L(\lambda)$  définie en fonction des  
différentes composantes spectrales  $\lambda$ , c'est-à-dire de la valeur de l'énergie  
25 entre deux longueurs d'ondes données. La source de lumière 50 est réflé-  
chie par une surface d'un objet 51 représenté par une image multi-spec-  
trale de réflectance  $R(x', y', \lambda)$  52. La réflectance représente une modulation  
du spectre de la source de lumière 50 par l'objet 51 sur lequel elle se  
réfléchit. L'image multi-spectrale de réflectance 52 est composée de  $P_\lambda$   
30 images de taille  $H \times W$  définies dans un repère orthogonal  $(x', y', \lambda)$ . La ré-  
flexion de la lumière 50 sur l'objet ou surface réfléchissante 51 donne une  
image de radiance  $L(\lambda)R(x', y', \lambda)$ .

Il est possible d'exprimer une image multi-composantes 54 à partir  
de l'image multi-spectrale de réflectance, en multipliant l'image multi-  
spectrale de réflectance 52 par la densité spectrale de puissance  $L(\lambda)$ , pour  
35 déterminer une image de radiance 53. Ensuite une matrice représentant  
l'image de radiance 53 est multipliée par les fonctions de transmission des

5 filtres  $F_1(\lambda), F_2(\lambda), \dots, F_p(\lambda)$  en fonction de la composante spectrale de la lumière et de  $C(\lambda)$ . Cette opération peut être réalisée sous forme vectorielle comme représenté sur les figures 6a et 6b.  $C(\lambda)$  est défini comme la sensibilité spectrale du chemin optique de la caméra sans la sensibilité spectrale de la mosaïque de filtres. La caméra peut comprendre sur son  
10 chemin optique un objectif, un filtre infrarouge, un filtre spatial passe bas, un système de micros lentilles, et un troisième capteur 55.  $C(\lambda)$  peut alors être défini comme le produit des fonctions de transmission spectrale de chaque composant du chemin optique sans les fonctions de transmission des filtres de la mosaïque. Si on considère uniquement le capteur sur le  
15 chemin optique de la caméra, alors  $C(\lambda)$  est la sensibilité du troisième capteur 55. Alternativement, on peut également considérer sur le chemin optique un ou plusieurs composants, en plus du capteur parmi : un objectif, un filtre infrarouge, un filtre spatial passe bas, un système de micros lentilles.

20 L'opération que l'on modélise à travers la détermination de la matrice de démosaïçage est la reconstruction d'une image multi-composantes à partir d'une image mosaïque 56 produite par un troisième capteur 55 sur lequel est positionnée une deuxième mosaïque de filtres 57 de fonction spectrale  $F(\lambda)$ , après acquisition de l'image de radiance 53. La deuxième  
25 mosaïque de filtres 57 est composée de  $P$  filtres définis pour  $P_\lambda$  intervalles de valeurs dans le domaine spectral. En général, on considère pour un domaine spectral de 400nm à 700nm un pas de 10nm. Le troisième capteur 55 est semblable au premier capteur 2 représenté sur la figure 1a et la deuxième mosaïque de filtres 57 est semblable à la première mosaïque  
30 de filtres 3 représentée sur la figure 1a.

La figure 6a représente plusieurs transformations vectorielles de l'image multi-spectrale de réflectance 52, ou plusieurs façons de déplier ladite image multi-spectrale de réflectance 52.

35 On peut construire une première matrice de vecteurs  $z_0$  dont les vecteurs sont des composantes spectrales de l'image multi-spectrale de réflectance 52, de taille  $P_\lambda$ . La première matrice de vecteurs  $z_0$  est composée de  $HW$  vecteurs différents.

5 Une deuxième matrice de vecteurs  $z$  représentant l'image de réflec-  
tance multi-spectrale 52 peut également être construite. Pour construire  
la deuxième matrice de vecteurs  $z$ , on regroupe les pixels par groupes de  
taille  $hw$ , chaque groupe correspondant aux positions des motifs de base  
6 sur la deuxième mosaïque de filtres 57 pour l'ensemble des composantes  
10 spectrales  $P_\lambda$ . Ainsi, la deuxième matrice de vecteurs  $z$  est composée de  
 $HW/(hw)$  vecteurs de taille  $hwP_\lambda$ .

Une troisième matrice de vecteurs  $z_1$  peut être construite à partir  
de l'image multi-spectrale de réflectance 52 en utilisant un voisinage de  
taille  $n_h \times n_w$  autour de chacun des motifs de base 6 sur la deuxième mo-  
15 saïque de filtres 57. Le vecteur cumulé des composantes spectrales de  
chacun des pixels du voisinage est de dimension  $n_h n_w P_\lambda$ . La troisième ma-  
trice  $z_1$  est alors composée de  $HW/(hw)$  vecteurs différents.

La figure 6b représente un calcul d'une matrice de vecteurs multi-  
20 composantes  $y_0$  à partir de la première matrice de vecteurs  $z_0$ . La première  
matrice de vecteurs  $z_0$  représentant l'image multi-spectrale de réflectance  
52 est dans un premier temps multipliée par une matrice diagonale  $L_0$  de  
dimensions  $P_\lambda \times P_\lambda$  dont les composantes sont les  $P_\lambda$  valeurs de la densité  
spectrale  $L(\lambda)$  de la source de lumière, les autres valeurs de la matrice  $L_0$   
25 étant mises à zéro. Puis dans un deuxième temps, le résultat est multiplié  
par une matrice diagonale  $C_0$  de dimensions  $P_\lambda \times P_\lambda$ . La matrice diagonale  
 $C_0$  comprend sur sa diagonale les composantes de la sensibilité spectrale  
 $C(\lambda)$  du chemin optique de la caméra sans la fonction de transmission  
spectrale de la mosaïque de filtres 57. Le résultat est ensuite multiplié par  
30 une transposée d'une matrice  $F_0$  de  $P_\lambda$  fonctions de transmission spectrale  
des  $P$  filtres  $F_1(\lambda), F_2(\lambda), \dots, F_P(\lambda)$  de la mosaïque de filtres, ladite matrice  
 $F_0$  étant de taille  $P_\lambda \times P$ . Le résultat est donc une matrice de vecteurs multi-  
composantes  $y_0$  de taille  $P \times HW$  telle que :

$$y_0 = F_0^T C_0 L_0 z_0 \quad (1019)$$

35

De la même manière que l'on construit la matrice de vecteurs  $y$  à  
partir de l'image résolue multi-composantes  $I_i$ , tel que représenté sur la  
figure 2b, c'est-à-dire en incorporant le premier motif de base 6, tel que

5 représenté sur la figure 4b, dans les vecteurs ligne de ladite matrice, il est possible de construire la deuxième matrice de vecteurs  $z$  à partir de l'image multi-spectrale de réflectance 52 en incluant le premier motif de base 6 dans le vecteur ligne. Dans ce cas,  $z$  est de dimensions  $P_\lambda hw \times HW(hw)$ . Il est alors possible de transposer l'expression (1019) pour ex-  
10 primer  $y$  en fonction de  $z$  :

$$y = F^T CLz \quad (1020)$$

avec les expressions suivantes :  $F = I_{hw} \otimes F_0$ ,  $C = I_{hw} \otimes C_0$ , et  $L = \otimes I_{hw} L_0$  dans lesquelles  $I_{hw}$  est une matrice identité de taille  $hw \times hw$ .

15 La nouvelle matrice de démosaïçage  $D_2$  appliquée à une image multi-spectrale peut alors s'écrire ainsi :

$$D_2 = F^T CLS_1 R' L_1^T C_1^T F_1 M_1^T (M_1 F_1^T C_1 L_1 R' L_1^T C_1^T F_1 M_1^T)^{-1} \quad (1021)$$

telle que :

$$R' = \frac{1}{NHWP_\lambda} E^{i=1..N} \{z_1 z_1^T\} \quad (1022)$$

20 avec

$$y_1 = F_1^T C_1 L_1 z_1 \quad (1023)$$

$$F_1 = I_{n_h n_w} \otimes F_0 \quad (1024)$$

$$L_1 = I_{n_h n_w} \otimes L_0 \quad (1025)$$

$$C_1 = I_{n_h n_w} \otimes C_0 \quad (1026)$$

25 et  $x_1 = M_1 y_1 = M_1 F_1 C_1 L_1 z_1$  et  $y = S_1 y_1$

La nouvelle matrice de démosaïçage  $D_2$  ainsi définie permet de tenir compte, en plus d'un arrangement quelconque des couleurs dans la mosaïque de filtres, caractérisé par  $M_1$ , des fonctions de transmission des filtres  $F_0$  et de la densité spectrale de la source de lumière  $L_0$ . Avantageu-  
30 sement, la formulation de  $D_2$  prend en compte la définition du voisinage réduit selon l'invention.

Il est également possible de calculer à priori la performance d'une mosaïque de filtres particulière, définie par l'arrangement spatial de ses filtres, les fonctions spectrales de transmission de ses filtres et la source  
35 de lumière utilisée. À cette fin, il est possible d'adapter au domaine multi-

5 spectral les équations de calcul de l'erreur d'estimation liée au démosaïçage (1008), (1009) et les équations de calcul de l'écart de couleur (1012), (1013), (1014), (1015) lié au démosaïçage.

L'efficacité quantique spectrale  $F_{QE}$  des filtres est équivalente au produit de la matrice de transmission des filtres  $F$  avec  $C$ ,  $C$  étant la sensibilité du capteur multipliée par les fonction de transmission spectrale des  
10 composants du chemin optique de la caméra sans la mosaïque de filtres. Par simplification, il est possible de considérer uniquement la sensibilité du capteur pour calculer  $C$ .

Avantageusement, dans l'équation (1021), la multiplication à  
15 gauche par l'expression  $F^T CLS_1$  projette l'image reconstruite selon les  $P$  composantes de couleurs. Autrement dit,  $F^T CLS_1$  projette les  $P_\lambda$  composantes du domaine spectrale sur les  $P$  couleurs des filtres de la mosaïque.

Si l'on ne réalise pas la projection de l'image reconstruite selon les  $P$  composantes de couleurs alors on obtient un filtre de reconstruction des  
20 images multi-spectrales. Il est ainsi possible d'estimer un spectre de couleurs pour chaque pixel de l'image reconstruite à partir de l'image mosaïque.

La figure 7 représente une transformation d'une matrice de démosaïçage, par exemple  $D_1$  en un filtre de convolution.  
25

Une matrice de démosaïçage, telle la matrice  $D_1$ , permet de reconstruire la matrice de vecteurs  $\tilde{y}$  représentant l'image reconstruite à partir de la matrice de vecteurs  $x_1$  représentant l'image mosaïque :  $\tilde{y} = D_1 x_1$ .

Chaque ligne de la matrice de démosaïçage peut être considérée  
30 comme un filtre de convolution qui permet de reconstruire une des couleurs de l'un des pixels d'un cinquième motif de base 70, de taille  $h \times w$  de l'image couleur, à  $P$  composantes. Le cinquième motif de base 70 est codé comme un premier vecteur colonne 71 de taille  $Phw$ , à partir d'un voisinage réduit 73, de taille  $n_h \times n_w$ , du motif de base  $hw$  comprenant ledit pixel correspondant dans l'image mosaïque. Le voisinage réduit 73 est codé comme un  
35 deuxième vecteur colonne 74.

Chaque ligne de la matrice de démosaïçage  $D_1$  peut être convertie en un filtre de convolution équivalent 72 qui s'applique sur chaque pixel de

5 l'image mosaïque pour reconstruire les pixels de l'image couleur à  $P$  com-  
posantes. Avantageusement, l'expression d'une matrice de démosaïçage en  
un ensemble de filtres de convolution, chacun applicable à un pixel de  
l'image mosaïque, permet d'éviter la conversion de l'image mosaïque en une  
matrice de vecteurs, qui représente une opération coûteuse en temps de  
10 calcul, en ressource de calcul et en mémoire. Avantageusement, on obtient  
ainsi une image reconstruite qui ne se présente pas sous la forme d'une  
matrice de vecteurs qu'il faut désassembler. Il est ainsi possible de gagner  
du temps de calcul, des ressources de calcul et de la mémoire en s'affran-  
chissant de l'opération de transformation de la matrice de vecteurs de  
15 l'image reconstruite en l'image reconstruite entière, dans laquelle chaque  
pixel du motif de base correspond à un filtre de convolution.

La transformation en filtres de convolution peut aussi s'appliquer à la  
matrice de démosaïçage  $D_2$  d'une image mosaïque multi-spectrale.

20 L'invention permet également la mise en œuvre d'une méthode d'op-  
timisation spectrale des fonctions de transmission des filtres et de l'arran-  
gement des filtres sur un motif de base d'une mosaïque.

À cette fin, on utilise un apprentissage du filtre ou matrice de démo-  
saïçage utilisant la méthode des moindres carrés avec un voisinage réduit  
25 30 selon l'invention. La matrice de démosaïçage peut être, comme on l'a  
vue précédemment et notamment dans l'expression (1021), exprimée à  
l'aide des fonctions spectrales des filtres  $F$ . A l'aide de la matrice de démo-  
saïçage, il est possible de calculer les critères de qualité  $MSE$  (pour Mean  
Square Error ou erreur quadratique moyenne) et  $\Delta E$  de la reconstruction de  
30 l'image captée par le troisième capteur 55, en une image couleur à  $P$  com-  
posantes. Il est ainsi possible d'optimiser les paramètres des fonctions spec-  
trales des filtres afin de maximiser les critères de qualité de l'image rendue.

Tel que représenté sur la figure 8, à partir d'une image acquise selon  
35 le principe représenté sur la figure 1 et en utilisant le procédé selon l'inven-  
tion, on peut reconstruire une image à  $P$  composantes de couleur. Il est  
aussi possible en utilisant l'équation (1016) et les suivantes de reconstruire

5 une image rendue dans un espace trichromatique normalisé comme l'espace CIE 1931-XYZ.

Sur la figure 8, un modèle de formation d'une image propose une reconstruction d'une image à partir d'une image de réflectance multi-spectrale 52 parmi :

- 10 • une image à trois composantes 80 dans l'espace trichromatique CIE 1931-XYZ, rendue par l'expression  $y_{XYZ} = F_{toXYZ} \times F^T LCz$  en partant de l'image de réflectance multi-spectrale 52, chacune des trois composantes correspondant à l'un des filtres  $X(\lambda), Y(\lambda), Z(\lambda)$  ;
- 15 • une image multi-composantes 54 à  $P$  composantes correspondant chacune à la sortie d'un des filtres  $F_1(\lambda), F_2(\lambda), \dots, F_P(\lambda)$  ;
- une image mosaïque 56 correspondant à l'image acquise par le troisième capteur 55 directement à travers une troisième mosaïque de filtres 83 de fonction spectrale  $F(\lambda)$  sous la forme  
20 d'une matrice de vecteurs dont les vecteurs sont les fonctions spectrales des filtres  $F_1(1), F_2(1), \dots, F_P(1)$ .

L'image de radiance 53 peut être mesurée par un premier système d'imagerie idéal théorique qui comprend un système de division du flux lumineux en trois composantes. Chacune des composantes passe au travers  
25 des filtres  $X(\lambda), Y(\lambda), Z(\lambda)$  et est ensuite mesurée par un quatrième capteur idéal 81.  $C(\lambda)$  est la sensibilité spectrale du chemin optique de la caméra y compris du capteur, mais sans la mosaïque de filtres. Un tel système d'imagerie idéale capture directement les coordonnées  $X, Y, Z$  de chaque pixel dans l'espace colorimétrique CIE 1931-XYZ et produit directement une  
30 image couleur 80 dite idéale, à trois composantes dans l'espace colorimétrique CIE 1931-XYZ.

Un deuxième système d'imagerie peut être composé de  $P$  filtres de couleurs dont la fonction de transmission est donnée par  $F_{i=1\dots P}(\lambda)$ . La lumière passe au travers de chacun de ces  $P$  filtres, elle est ensuite mesurée  
35 par un troisième capteur 55. Le troisième capteur 55 produit une image multi-composantes 54 à  $P$  composantes de couleur, correspondant chacune à un des  $P$  filtres  $F_i(\lambda)$ . La sensibilité spectrale du chemin optique de la caméra y compris le troisième capteur 55, mais sans la mosaïque de filtres,

5 est  $C(\lambda)$ . Alternativement il est possible de considérer que  $C(\lambda)$  est unique-  
ment la sensibilité spectrale du capteur.

Un troisième système d'imagerie est celui que l'on cherche à modéli-  
ser. Il est composé d'une deuxième matrice, ou mosaïque, de filtres 83 de  
10  $P$  couleurs différentes disposées sur le premier motif de base 6 et dupliqué  
à la taille du troisième capteur 55. Le troisième système d'imagerie com-  
prend également le troisième capteur 55.

À partir de la première matrice de vecteurs  $z_0$ , on peut construire une  
matrice  $y_{XYZ}$  de vecteurs correspondant à l'image idéale de composantes  
XYZ telle que :

$$15 \quad y_{XYZ} = XYZ^T L_0 z_0 \quad (1027)$$

avec, par exemple :

$$XYZ = \begin{bmatrix} X(380) & Y(380) & Z(380) \\ X(381) & Y(381) & Z(381) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X(780) & Y(780) & Z(780) \end{bmatrix} \quad (1028)$$

$$L_0 = \begin{bmatrix} L(380) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & L(381) & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & L(780) \end{bmatrix} \quad (1029)$$

20 On a également :

$$C_0 = \begin{bmatrix} C(380) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C(381) & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & C(780) \end{bmatrix} \quad (1030)$$

La matrice  $y_{XYZ}$  est de taille  $3 \times HW$  et peut être transformée en une  
image de taille  $H \times W \times 3$  comprenant les trois composantes XYZ pour chaque  
pixel de l'image reconstruite.

25 A partir de la troisième matrice  $z_1$  de taille  $n_h n_w P_\lambda \times HW (hw)$  la matrice  
de démosaïçage  $D_2$  peut s'écrire selon l'expression (1021). :

Cette écriture de  $D_2$  permet de calculer une fois pour toute la matrice  
de corrélation  $R'$  pour l'ensemble des images de la base de données d'images  
de références. Ceci permet de calculer la matrice de démosaïçage  $D_1$  pour  
30 des mosaïques de filtres définies à postériori et encodées dans la matrice  $F_1$   
des fonctions spectrales des filtres. Ainsi, le modèle de  $D_2$  selon l'expression  
(1031) permet avantageusement une expression directe de l'opérateur ou

5 matrice de démosaïçage  $D_2$  en fonction des données du problème que l'on cherche à résoudre, à savoir une optimisation des fonctions spectrales des filtres de la mosaïque de filtres. Ainsi il est possible d'obtenir  $F_1$  de façon à optimiser la qualité de la reconstruction des images acquises.

Les critères d'optimisation utilisés sont les critères de qualité de re-  
10 construction d'images : spatial  $MSE$  et colorimétrique  $\Delta E$ .

Les critères d'optimisation sont calculés entre une image idéale 80, rendue par un quatrième capteur idéal 81 à partir de l'image multi-spectrale de réflectance 52, et une image mosaïque 56 acquise à travers la troisième mosaïque de filtres 83, démosaïçée, c'est à dire dématricée, et convertie  
15 dans un espace colorimétrique permettant le calcul des critères d'optimisation.

Pour le calcul des critères d'optimisation, il est possible de se placer dans l'espace sRGB ou tout autre espace apparenté comme Adobe®RGB. Pour se placer dans l'espace sRGB, on réalise les opérations précédemment  
20 décrites c'est-à-dire la conversion dans l'espace de couleur trichromatique normalisé CIE 1931 - XYZ en utilisant les équations (1010) et (1011) puis une conversion dans l'espace sRGB à l'aide des équations (1016), (1017), (1018).

Il est également possible d'utiliser un autre espace de couleur. Par exemple un espace couleur pouvant s'exprimer à partir de l'espace XYZ peut  
25 être obtenu en modifiant la matrice  $A$ . Les autres espaces nécessitent de remplacer  $F_{toXYZ}$ . Par exemple si l'on appelle  $ABC$  un espace de destination, il est nécessaire d'estimer  $F_{toABC}$  en remplaçant  $XYZ$  par  $ABC$  dans l'expression (1010).

Il est aussi possible de calculer un critère de type  $MSE$  ou un critère  
30 de type  $PSNR$ . Le  $PSNR$  (Peak To Noise Ratio) est une mesure de distorsion colorimétrique de l'image. Pour deux images multi-composantes exprimées dans l'espace sRGB,  $I'(x', y', c)$  et  $K'(x', y', c)$ , normalisées entre 0 et 1, avec  $c$  l'une des trois composantes de couleur, le calcul du critère  $MSE$  s'effectue  
35 ainsi :

$$MSE = \frac{1}{HWP} \sum_{x'=1..H} \sum_{y'=1..W} \sum_{c=1..P} (I'(x', y', c) - K'(x', y', c))^2 \quad (1031)$$

Le critère PNSR se calcule de la manière suivante :

5 
$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{1}{MSE} \quad (1032)$$

Le calcul de  $\Delta E$  est réalisé en approximant le calcul non linéaire par une fonction linéaire par morceaux de la manière suivante, pour deux images  $I'$  et  $K'$  exprimées dans le repère XYZ :

$$\Delta E = \sqrt{\frac{1}{HW} \sum_{x'=1..H} \sum_{y'=1..W} (I'(x', y', c) - K'(x', y', c))} \quad (1033)$$

10 dans laquelle :

$$K'' = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 & 116 & 0 \\ 500 & -500 & 0 \\ 0 & 200 & -200 \end{bmatrix} \text{diag}(XYZ \cdot \text{diag}(XYZ^T L))^{-1} \quad (1034)$$

où *diag* est une fonction qui place un vecteur dans la diagonale d'une matrice.

15 La figure 9 représente les différentes opérations réalisées sur l'image de réflectance  $R(x', y', \lambda)$ .

Tel que représenté sur la figure 9, trois images différentes sont produites :

- une première image 103 à trois composantes dans l'espace colorimétrique CIE 1931-XYZ telle que l'image couleur idéale 80 ;
- 20 • une deuxième image 104 à trois composantes provenant du troisième capteur 55 sur lequel sont positionnés trois filtres de couleurs, telle l'image multi-composantes 54 ;
- une troisième image 105 à trois composantes provenant du troisième capteur 55 sur lequel est positionnée une troisième
- 25 mosaïque de filtres 83, correspondant à l'image mosaïque 56.

Chaque image est issue d'une parmi trois voies 100, 101, 102 de traitements différentes en sortie des troisième et quatrième capteurs 55, 81.

30 Une première voie 100 utilise un premier traitement d'une deuxième voie de traitements 101 qui consiste à transformer l'image de réflectance multispectrale  $R(x', y', \lambda)$  en une matrice  $z_0$  de  $HW$  vecteurs de taille  $P_\lambda$  tel que représenté sur la figure 6a. Il est également possible de partir de l'image de radiance  $L(\lambda)R(x', y', \lambda)$ .

35 Ensuite un premier traitement de la première voie de traitements 100 est une projection de la matrice  $z_0$  dans l'espace XYZ tel que décrit par l'équation (1027). On obtient une matrice de vecteurs  $z_{XYZ}$  de taille  $3 \times HW$ .

5 Ensuite, la matrice  $z_{XYZ}$  est projetée dans l'espace sRGB en lui appliquant la matrice  $A$  tel que décrit dans les équations (1017) et (1018). On obtient une nouvelle matrice  $z_{sRGB}$  de taille  $3 \times HW$ . La matrice  $z_{sRGB}$  peut ensuite être « dépliée » pour reconstituer la première image 103 à trois composantes de taille  $H \times W$  dans l'espace colorimétrique sRGB.

10 La deuxième voie 101 réalise sur le vecteur  $z_0$  l'opération représentée sur la figure 6b pour obtenir la matrice de vecteurs  $y_0$  selon l'équation (1019). La matrice de vecteurs  $y_0$  est ensuite transformée, tel que représenté sur la figure 2b, en une matrice de  $HW/(hw)$  vecteurs de dimension  $Phw$ . Ensuite la matrice de vecteurs  $y_0$  est projetée dans l'espace XYZ par la fonction  $FtoXYZ$  tel qu'explicité par la relation (1011). On obtient ainsi une  
15 matrice de trois vecteurs  $y_{0XYZ}$  de taille  $HW$ . Ensuite, la matrice  $y_{0XYZ}$  est projetée dans l'espace sRGB en lui appliquant la matrice  $A$  tel que décrit dans les équations (1017) et (1018). On obtient une nouvelle matrice  $y_{0sRGB}$  de taille  $3 \times HW$ . La matrice  $y_{0sRGB}$  peut ensuite être « dépliée » pour reconstituer la deuxième image 104 à trois composantes de taille  $H \times W$  dans l'espace colorimétrique sRGB.  
20

Une troisième voie 102, partant de l'image de réflectance multispectrale  $R(x', y', \lambda)$  acquise par le troisième capteur 55 recouvert de la troisième mosaïque de filtres 83 donne une matrice  $z_1$  telle que représentée sur la  
25 figure 6a de taille  $P_\lambda n_h n_w \times HW(hw)$ . A partir de la matrice  $z_1$  on peut obtenir une matrice  $x_1$  de taille  $n_h n_w \times HW/(hw)$  telle que  $x_1 = M_1 F_1^T C_1 L_1 z_1$  selon la relation (1023). Ensuite en appliquant une matrice de démosaïçage  $D_0$  sous la forme de la matrice de démosaïçage  $D_2$  décrite dans l'expression (1021), on obtient  $\tilde{y}_1$  de taille  $P_\lambda n_h n_w \times HW/(hw)$  telle que  $\tilde{y}_1 = D_0 x_1$ . On applique alors  
30 à  $\tilde{y}_1$  la transformation  $FtoXYZ$  pour obtenir l'image résultante dans l'espace XYZ selon l'équation (1011) :  $\tilde{y}_{XYZ} = (I_{hw} \otimes FtoXYZ)\tilde{y}_1$  de taille  $3 \times HW$ . Pour finir en appliquant la matrice  $A$  telle que définie par l'expression (1018), on obtient  $\tilde{y}_{sRGB}$  telle que  $\tilde{y}_{sRGB} = A(I_{hw} \otimes FtoXYZ)\tilde{y}_{XYZ}$ , de taille  $3 \times HW$ . La matrice  $\tilde{y}_{sRGB}$  obtenue est ensuite « dépliée » afin de reconstruire la troisième  
35 image 105 à trois composantes dans l'espace colorimétrique sRGB.

À partir des différentes matrices de vecteurs représentées sur la figure 9, on peut calculer plusieurs  $\Delta E$  différents :  $\Delta E_1$ ,  $\Delta E_2$ ,  $\Delta E_3$  et un  $MSE$ , que l'on cherche à minimiser pour optimiser les fonctions spectrales et

5 leur répartition sur la troisième mosaïque de filtres 83. Les calculs des différents  $\Delta E$  sont réalisés d'après les formules (1012), (1013), (1014) et (1015).

Un premier  $\Delta E_1$  est calculé entre l'image contenue dans la matrice  $z_{XYZ}$  rendue directement à partir de l'image de réflectance multi-spectrale  
10  $R(x', y', \lambda)$  et l'image acquise directement à travers les filtres  $F_1, F_2, F_3$  et passée ensuite par la conversion vers l'espace colorimétrique XYZ :  $y_{0XYZ}$ .

Un deuxième  $\Delta E_2$  est calculé entre l'image contenue dans la matrice  $z_{XYZ}$  et l'image exprimée dans l'espace colorimétrique XYZ après acquisition par l'intermédiaire de la troisième mosaïque de filtres 83 :  $\tilde{y}_{XYZ}$ .

15 Un troisième  $\Delta E_3$  est un critère purement spectral ne faisant pas appel à la reconstruction d'une image pour tester l'aptitude des filtres à rendre les couleurs. Pour calculer le troisième  $\Delta E_3$ , on utilise les spectres d'une charte ou mire de couleurs de MacBeth qui comprend 24 couleurs. Alternativement, il est aussi possible d'utiliser n'importe quelle autre base de référence spec-  
20 trale. À partir des données multi-spectrales de réflectance des 24 carrés de la mire de MacBeth, on applique d'une part directement la transformation dans l'espace colorimétrique XYZ pour obtenir une quatrième image et d'autre part on applique les filtres  $F_1, F_2, F_3$  et la sensibilité du chemin optique de la caméra puis une conversion de l'image en sortie du troisième  
25 capteur 55 dans l'espace colorimétrique XYZ pour obtenir une cinquième image. Les quatrième et cinquième images sont utilisées pour calculer le troisième  $\Delta E_3$ .

Les  $MSE$  et  $PNSR$  sont quant à eux calculés entre la première image  
103 rendue directement à partir de l'image multi-spectrales de réflectance  
30 et la troisième image rendue à partir de l'image multi-spectrales de réflectance après son passage par la matrice de mosaïque 83 et le troisième capteur 55.

La figure 10 représente le dispositif et le procédé de démosaïçage  
35 selon l'invention.

Une première étape 100 est une étape d'acquisition d'une image couleur 101 par un dispositif d'acquisition d'images 102. Le dispositif d'acquisition d'images 102 comprend un capteur 2, 55 tel que représenté sur les

5 figures 1a, 5 et 8. Le dispositif d'acquisition d'images 102 comprend en outre un filtre mosaïque 3, 57, 83, ou mosaïque de filtres, sous la forme d'une matrice de  $HW$  filtres telle que représentée sur les figures 1a, 5 et 8. La mosaïque de filtres 3, 57, 83 est appliquée sur le capteur. Le dispositif comprend également un dispositif optique qui fait converger la lumière captée  
10 par la caméra vers le capteur 2, 55 équipé du filtre mosaïque 3, 57, 83. Ainsi, avant d'atteindre une cellule du capteur 2, 55, la lumière passe à travers l'un des filtres de couleur 7 de la mosaïque de filtres 3, 57, 83. Un signal brut 103 provenant du capteur 2, 55 peut se représenter sous la forme d'une image mosaïque 40 de taille  $H \times W$  telle que représentée sur la  
15 figure 4a. L'image mosaïque 40 est ensuite transmise à un premier calculateur ou ordinateur 104 qui réalise une opération de démosaïçage 105 selon l'invention. L'opération de démosaïçage consiste à multiplier l'image mosaïque 40 représentée sous forme matricielle  $x_1$  telle que représentée sur la figure 4a par une matrice de démosaïçage  $D_0, D_1, D_2$ . Le résultat de l'opération de démosaïçage 105 est une matrice de vecteurs qui est transformée  
20 en image rendue à plusieurs composantes de couleur selon le processus inverse à celui représenté sur la figure 2b qui consiste à « déplier » la matrice de vecteurs pour la représenter sous la forme d'une image à plusieurs composantes. L'image reconstruite 106 peut ensuite être transmise à un  
25 moyen adapté à son exploitation comme un afficheur 107.

La figure 11 représente un procédé et son dispositif de construction d'une matrice de démosaïçage.

Le dispositif de construction d'une matrice de démosaïçage comprend  
30 une première base de données 110. La première base de données 110 comprend des images dites de références. Les images de références peuvent être des images multi-composantes, ou des images multi-spectrales. Les images de références peuvent également être des images hors du spectre visible. À partir de la première base de données 110, une première étape de  
35 construction d'une matrice de démosaïçage est une étape de modélisation d'images mosaïques issues d'un capteur recouvert d'une mosaïque de filtres. La modélisation est réalisée par une application de simulation 111 qui implémente un modèle du capteur 2, 55. L'application de simulation 111 peut

5 être exécutée par un ou plusieurs processeurs d'un deuxième ordinateur, ou ordinateur 112. Alternativement, l'application de simulation 111 peut être exécutée par le premier ordinateur 104.

À partir de chaque image de référence, l'application de simulation 111 produit une image mosaïque qui vient peupler une deuxième base de données 114 d'images dites mosaïques.

Une fois la deuxième base de données construite 114, la deuxième étape 115 du procédé de construction de la matrice de démosaïçage peut être mise en œuvre. Le procédé de construction de la matrice de démosaïçage peut être mis en œuvre par un programme d'ordinateur qui s'exécute sur un ou plusieurs processeurs du deuxième ordinateur 112. Alternativement, le procédé de construction de la matrice de démosaïçage peut être mis en œuvre sur un troisième ordinateur, ou ordinateur non représenté, ou encore le premier ordinateur 104. Le procédé de construction d'une matrice de démosaïçage utilise les images des deux bases de données 110, 114. La première base de données 110 est utilisée afin de produire une image mosaïque à partir d'une image de référence en lui appliquant une matrice de démosaïçage sous test, c'est-à-dire mettant en œuvre le procédé de démosaïçage selon l'invention. L'image mosaïque ainsi produite est alors comparée à l'image mosaïque correspondant à l'image de référence dans la deuxième base de données 114. Cette comparaison consiste à calculer une erreur entre la matrice mosaïque produite par simulation et la matrice mosaïque construite par application de la matrice de démosaïçage sous test. Le procédé de construction de la matrice de démosaïçage est un procédé itératif : si l'erreur de construction de la matrice mosaïque est inférieure à un seuil, le procédé s'arrête. Dans le cas inverse, une nouvelle matrice de démosaïçage est déterminée et testée.

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.

Alternativement, ces étapes peuvent être réalisées par des circuits intégrés spécifiques comprenant une logique câblée pour exécuter les

5 étapes, ou par toute combinaison de composants programmables et composants personnalisés.

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.

10

5

## REVENDEICATIONS

1. Procédé de reconstruction d'une image couleur, acquise par un capteur photosensible (2) de taille  $H \times W$ , recouvert d'une mosaïque (3), de taille  $H \times W$ , de  $P$  filtres (7) de différentes couleurs composant un motif de base (6) de taille  $h \times w$  tel que  $h < H$  et  $w < W$ , ledit motif de base (6) de la mosaïque de filtres (3) se répétant de façon à couvrir la mosaïque de filtres (3) sans recouvrement entre les motifs de base (6), ledit procédé étant mis en œuvre par ordinateur et étant caractérisé en ce qu'il comprend au moins les étapes

10

15

suivantes :

- une première étape préalable de construction d'une matrice de démosaïçage  $D$  à partir d'une simulation utilisant une première base de données de  $N$  images  $I_i, i \in [1, \dots, N]$ , à  $P$  composantes de couleurs, dites images de référence, pour produire une deuxième base de données de  $N$  images  $J_i, i \in [1, \dots, N]$  simulant des images rendues issues du capteur (2), après acquisition par ledit capteur (2) des images de la première base de données, lesdites images de référence  $I_i$  et rendues  $J_i$  étant respectivement représentées sous la forme de matrices de  $HW/(hw)$  vecteurs  $y_1, x_1$  tels que :
- 20

25

- les composantes de  $y_1$  sont les  $P$  composantes d'un voisinage réduit de taille  $n_h \times n_w$  d'un des  $HW/(hw)$  motifs de base appliqué à l'image de référence  $I_i$ ,

- les composantes de  $x_1$  sont les composantes d'un voisinage réduit de taille  $n_h \times n_w$  de l'un des  $HW/(hw)$  motifs de base appliqué à l'image rendue  $J_i$ ,

30

avec  $n_h > h$  et  $n_w > w$  ;

- une deuxième étape de reconstruction d'une image couleur réalisant le produit de la matrice de démosaïçage  $D$  avec une représentation matricielle d'une image mosaïque (5) provenant du capteur (2) après acquisition de l'image couleur par ledit capteur (2), ledit produit de la matrice de démosaïçage  $D$  avec la représentation matricielle de l'image mosaïque (5) mettant en œuvre une interpolation de la cou-
- 35

5 leur de chaque pixel de l'image mosaïque (5) en fonction d'un voisinage, de taille  $n_h \times n_w$  pixels, d'un motif de base (43) de taille  $h \times w$ , correspondant au motif de base (6) de la mosaïque de filtres (3).

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que  $n_h n_w = Phw$ .

10

3. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'une première matrice de démosaïçage  $D_1$  s'exprime comme une espérance mathématique  $E$  calculée sur les  $N$  images de référence de la première base de données :  $D_1 = E^{i=1..N} \{y x_1^T (x_1 x_1^T)^{-1}\}$ , avec  $y$  une matrice de  
15  $HW/(hw)$  vecteurs de taille  $Phw$  représentant l'image couleur.

4. Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la première matrice de démosaïçage  $D_1$  s'exprime ainsi :  $D_1 = S_1 R M_1^T (M_1 R M_1^T)^{-1}$  avec  $x_1 = M_1 y_1$ ,  $M_1$  étant une matrice de projection de  $y_1$  sur  $x_1$ ,  $y = S_1 y_1$ ,  $S_1$   
20 étant une matrice de réduction du voisinage du vecteur  $y_1$  et de transformation du vecteur  $y_1$  en  $y$ , et  $R = \frac{1}{NPHW} E^{i=1..N} \{y_1 y_1^T\}$  étant une matrice de corrélation des images résolues de la première base de données exprimées en fonction des voisinages réduits de taille  $n_h \times n_w$ .

25 5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que la matrice de démosaïçage s'exprime en fonction de la sensibilité spectrale du capteur (2) et des fonctions spectrales des  $P$  filtres (7) de couleurs différentes.

30 6. Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la première base de données comprenant des images multi-spectrales de réflectance, une deuxième matrice de démosaïçage  $D_2$  est définie par l'expression :

$$D_2 = F^T C L S_1 R' L_1^T C_1^T F_1 M_1^T (M_1 F_1^T C_1 L_1 R' L_1^T C_1^T F_1 M_1^T)^{-1}, \text{ avec } R' = \frac{1}{NHWP_\lambda} E^{i=1..N} \{z_1 z_1^T\},$$

35 la deuxième matrice de démosaïçage  $D_2$  étant construite selon les étapes suivantes :

- 5
- calcul d'une matrice de vecteurs  $y_0$  représentant une image à  $P$  composantes en fonction d'une matrice de vecteurs  $z_0$  représentant une image multi-spectrale de réflectance obtenue à partir d'une réflexion d'un objet éclairé par une source de lumière de densité spectrale de puissance  $L(\lambda)$ ,  $\lambda$  étant une composante spectrale, tel que :  $y_0 =$   
10  $F_0^T C_0 L_0 z_0$ , avec  $F_0$  une matrice de taille  $P_\lambda \times P$  de fonctions de transmission spectrale des filtres de la mosaïque (3), avec  $C_0$  une matrice diagonale de taille  $P_\lambda \times P_\lambda$  d'une sensibilité spectrale du capteur,  $L_0$  une matrice diagonale de taille  $P_\lambda \times P_\lambda$  des densités spectrales de puissance de la source de lumière ;
  - 15 • construction de la matrice de vecteurs  $y$  à partir de l'image multi-composantes et d'une matrice de vecteurs  $z$ , construite à partir de l'image multi-spectrale de réflectance, lesdites matrices de vecteurs  $y$  et  $z$  comprenant ledit motif de base, tels que  $y = F^T C L z$  avec  $F =$   
20  $I_{hw} \otimes F_0$ ,  $I_{hw}$  étant une matrice identité de dimensions  $hw \times hw$ ,  $C =$   
25  $I_{hw} \otimes C_0$ , et  $L = I_{hw} \otimes L_0$  ;
  - construction d'une matrice de vecteurs  $z_1$  composée des voisinages réduits de taille  $n_h \times n_w$  du motif de base de l'image de multi-spectrale de réflectance telle que  $y_1 = F_1^T C_1 L_1 z_1$ ,  $y_1$  étant une matrice composée des voisinages réduits de taille  $n_h \times n_w$  du motif de base de taille  $h \times w$   
de l'image spectrale multi-spectrale de réflectance, avec  $F_1 = I_{n_h n_w} \otimes$   
30  $F_0$ ,  $I_{n_h n_w}$  étant une matrice identité de dimensions  $n_h n_w \times n_h n_w$ ,  $L_1 =$   
 $I_{n_h n_w} \otimes L_0$ , et  $C_1 = I_{n_h n_w} \otimes C_0$  ;
  - construction de la deuxième matrice de démosaïçage  $D_2$  avec  $M_1$  étant une matrice de projection de  $y_1$  sur  $x_1$  et  $S_1$  étant une matrice de réduction du voisinage du vecteur  $y_1$  et de transformation en  $y$ .

7. Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce que  $C_0$  est un produit des sensibilités spectrales de composants du chemin optique de la caméra par la sensibilité spectrale du capteur, lesdits composants comprenant au moins l'un parmi : un objectif de la caméra, un filtre infrarouge,  
35 un filtre spatial passe-bas, un système de micros-lentilles.

- 5 8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que chaque ligne de la matrice de démosaïçage  $D, D_1, D_2$  s'exprime comme un filtre de convolution.
9. Système de traitement de données comprenant des moyens de mise en œuvre des étapes du procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes.
10. Produit programme d'ordinateur comprenant des instructions qui lorsque le programme est exécuté par un ordinateur, conduisent l'ordinateur à  
15 mettre en œuvre les étapes du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8.
11. Procédé d'optimisation de fonctions spectrales de filtres et d'arrangement des filtres (7) sur une mosaïque (3) de  $P$  filtres (7) de couleurs différentes, répétés de manière à remplir un motif de base (6) de taille  $h \times w$ , ledit motif de base (6) se répétant de façon à couvrir la mosaïque de filtres (3), ladite mosaïque de filtres (3) étant appliquée sur un capteur photosensible (2), ledit procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend une optimisation multicritères par minimisation d'une erreur de restitution colorimétrique  
25 et par minimisation d'une erreur quadratique moyenne entre une image provenant d'un capteur idéal, acquise à partir d'une image d'une base de données d'images de référence, et une image provenant d'un capteur recouvert de la mosaïque (3) de  $P$  filtres (7) différents, acquise à partir de la même image de la base de données d'images de référence, ladite image acquise  
30 par le capteur (2) recouvert de la mosaïque (3) de filtres (7) étant reconstruite par le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7.
12. Procédé selon la revendication 11, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une minimisation d'une erreur de restitution colorimétrique entre  
35 l'image provenant du capteur idéal acquise à partir de l'image de la base de données d'images, et une image provenant d'un capteur recouvert d'une série de  $P$  filtres, chacun des  $P$  filtres recouvrant la totalité du capteur, ladite image étant acquise à partir de la même image de la base de donnée.

5

13. Procédé selon la revendication 12, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une minimisation d'une erreur de restitution colorimétrique entre une mire de MacBeth acquise par un capteur parfait et une mire de MacBeth acquise par un capteur muni de la mosaïque des  $P$  filtres.

10

14. Système de traitement de données comprenant des moyens de mise en œuvre des étapes du procédé selon les revendications 11 à 13.

15

15. Produit programme d'ordinateur comprenant des instructions qui lorsque le programme est exécuté par un ordinateur, conduisent l'ordinateur à mettre en œuvre les étapes du procédé selon l'une quelconque des revendications 11 à 13.

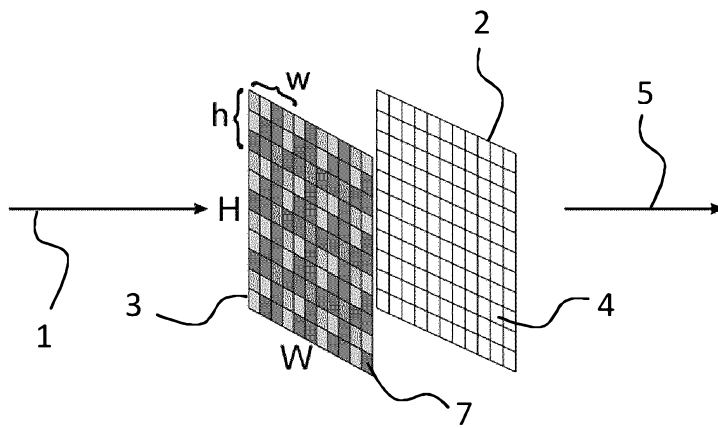


FIG 1a

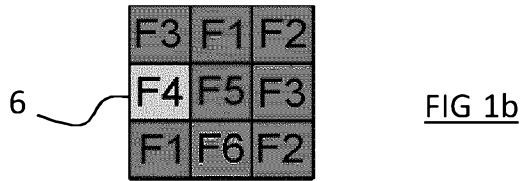


FIG 1b

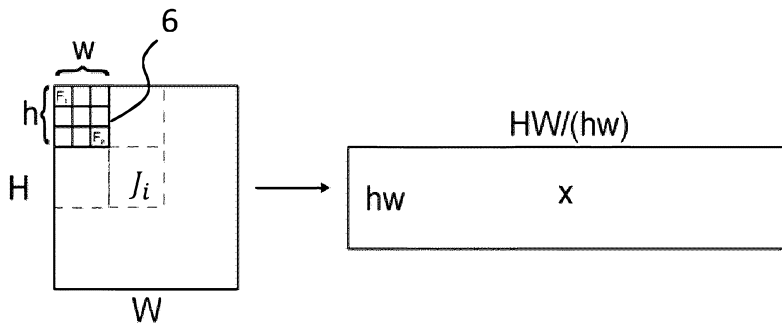


FIG 2a

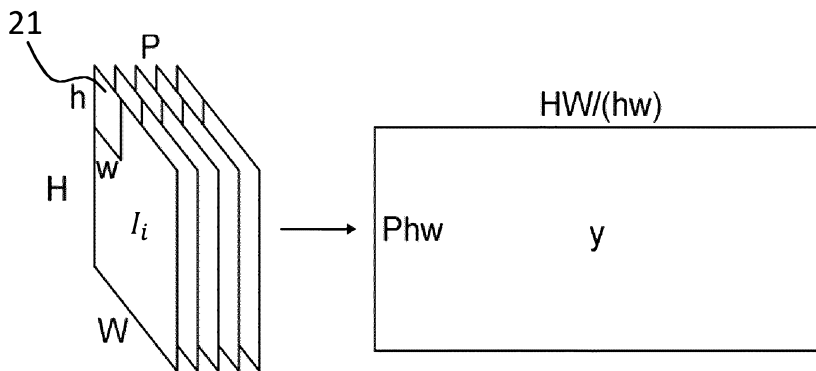


FIG 2b

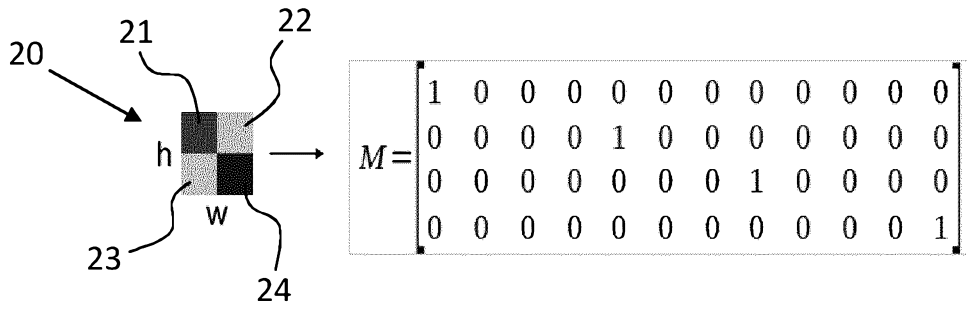


FIG 2c

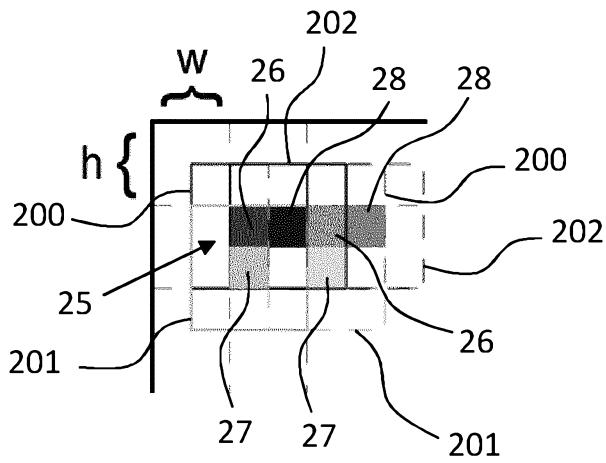


FIG 2d

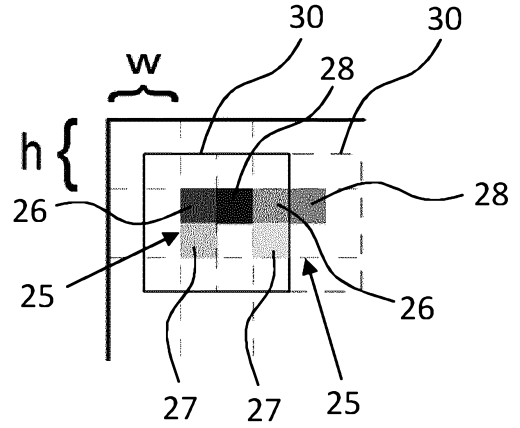


FIG 3

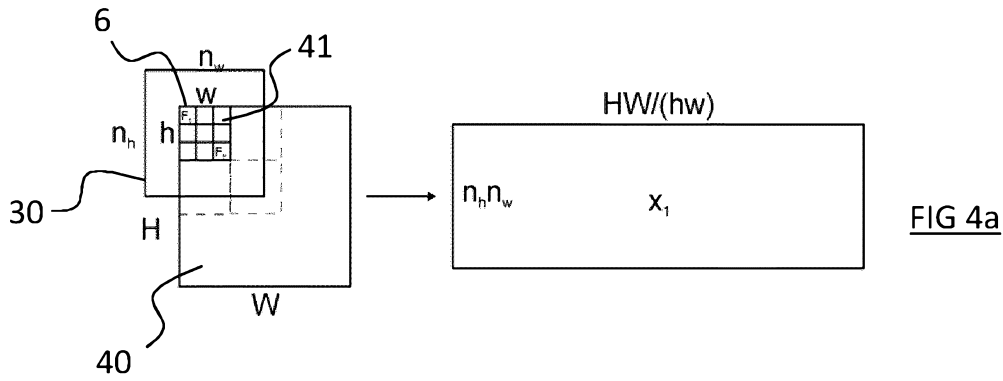


FIG 4a

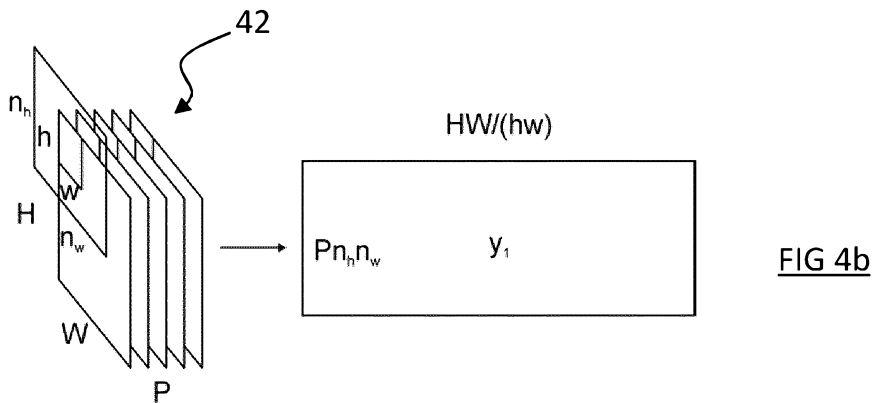


FIG 4b

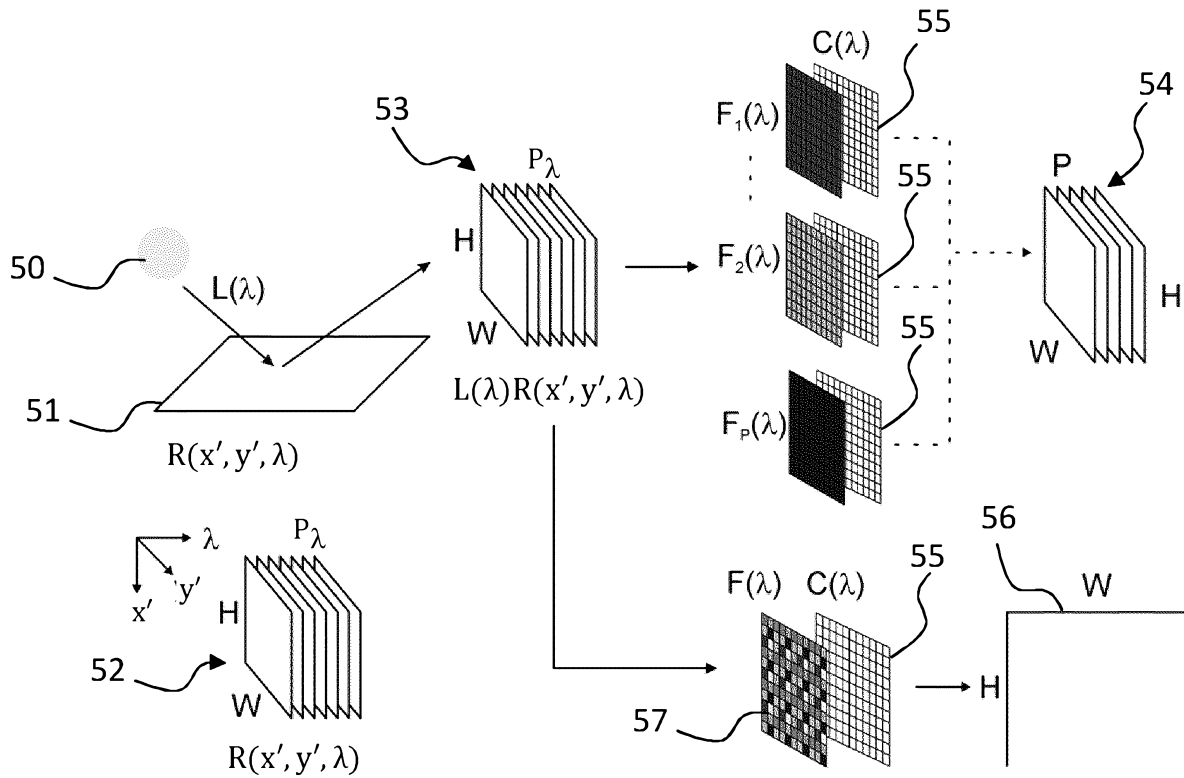


FIG 5

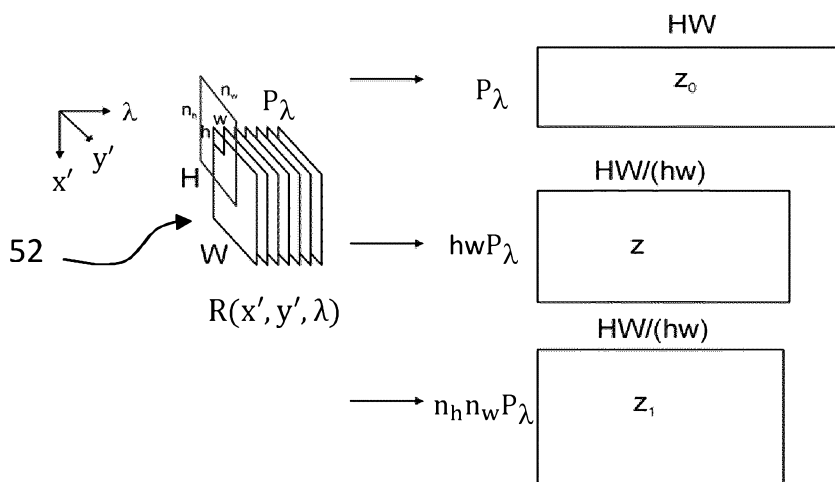


FIG 6a



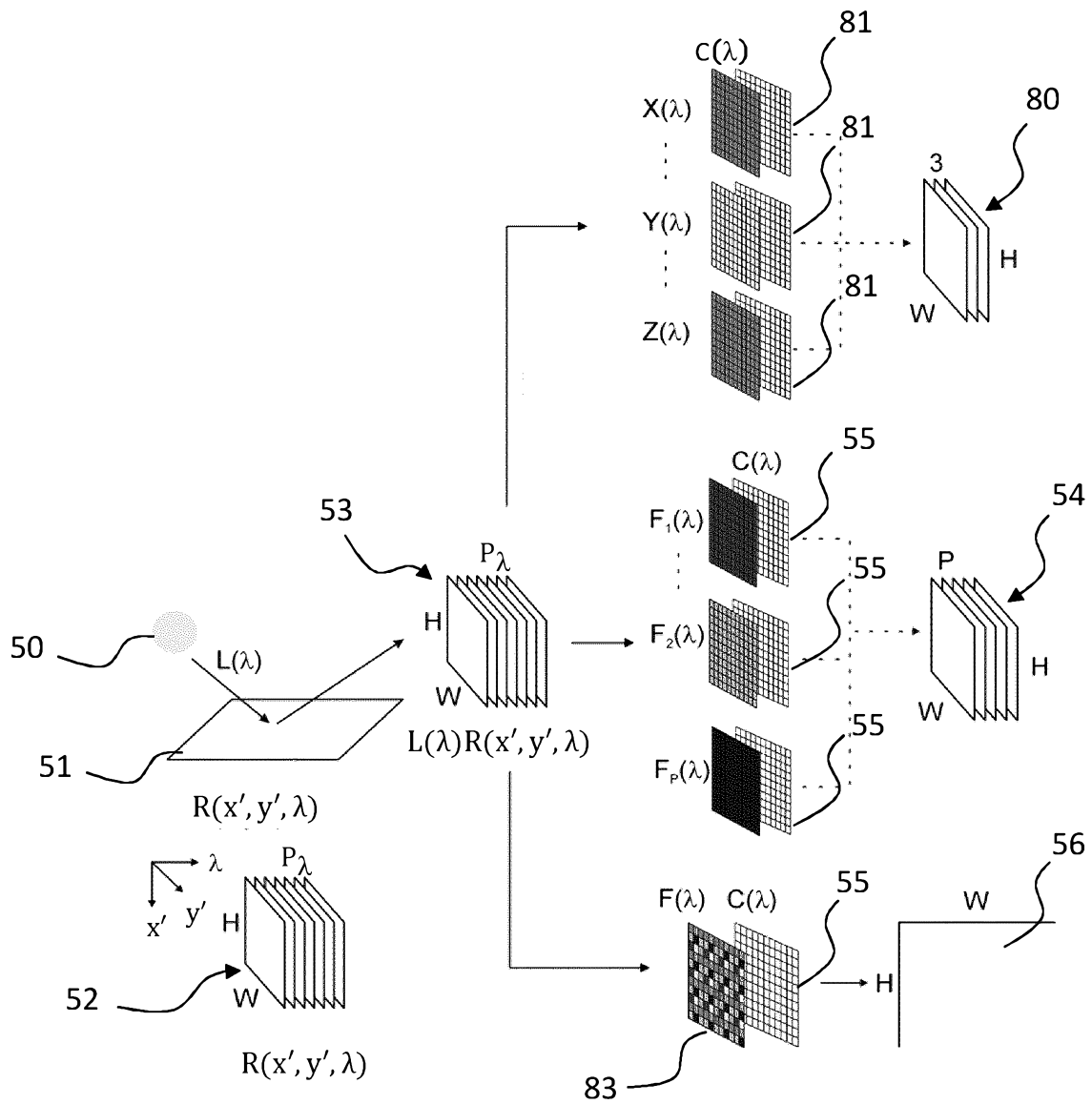


FIG 8

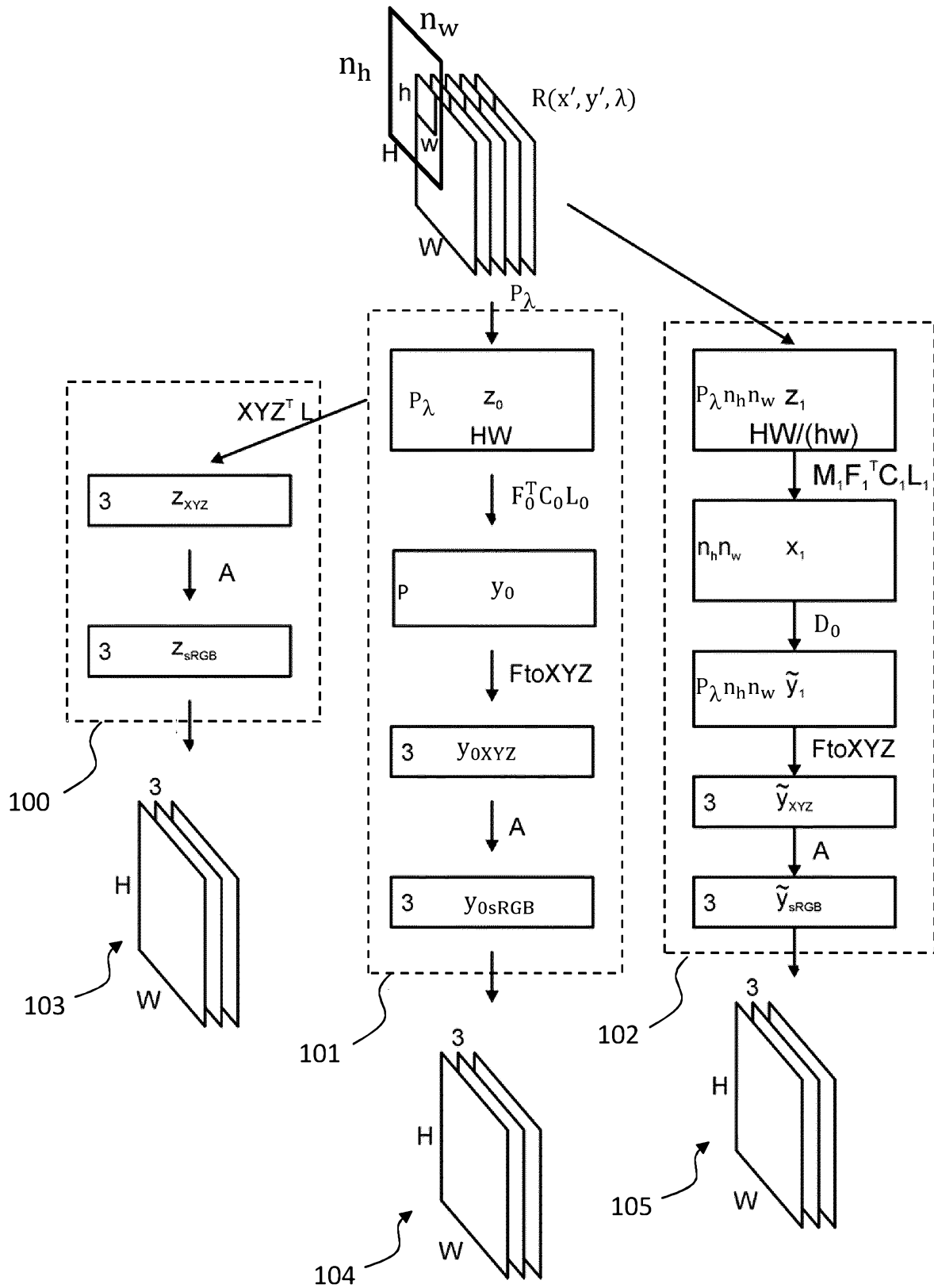


FIG 9

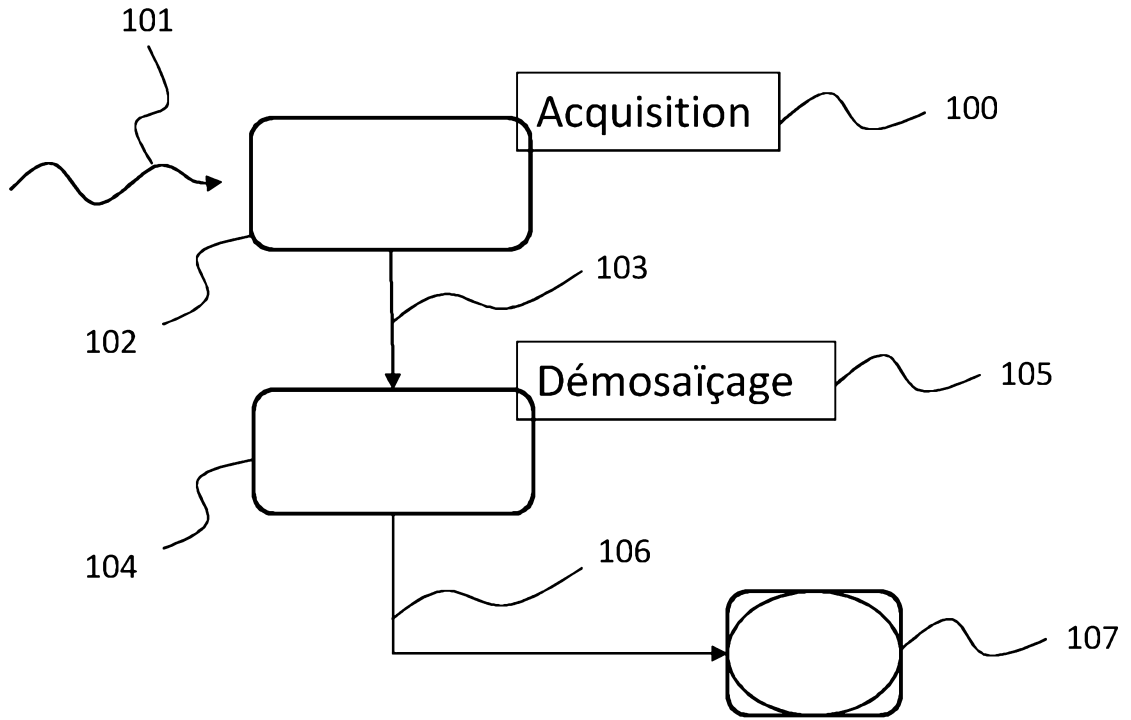


FIG 10

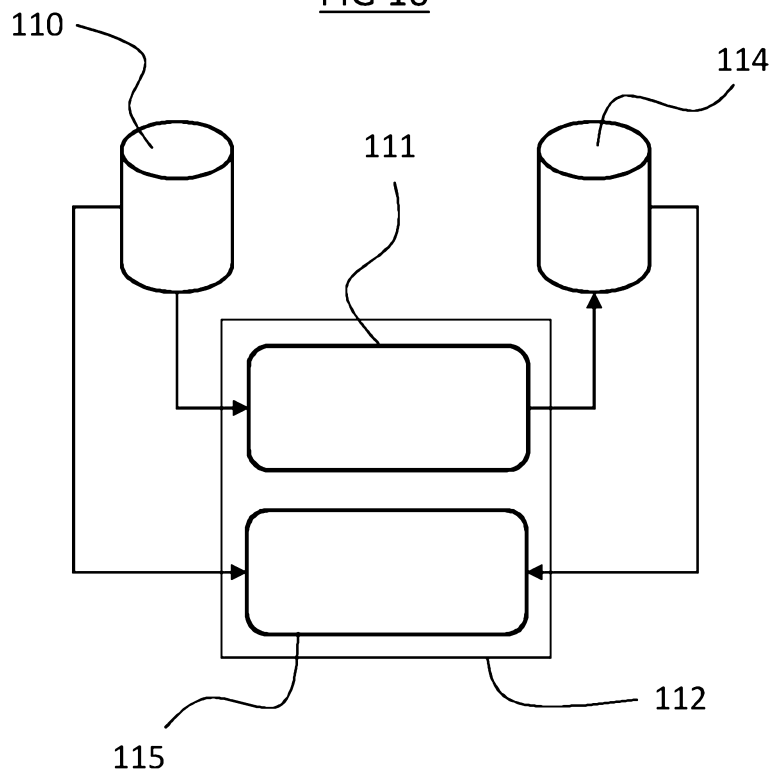


FIG 11

**RAPPORT DE RECHERCHE  
 PRÉLIMINAIRE**

 établi sur la base des dernières revendications  
 déposées avant le commencement de la recherche
N° d'enregistrement  
nationalFA 853238  
FR 1851978

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A,D	EP 2 561 681 A1 (CENTRE NAT RECH SCIENT [FR]) 27 février 2013 (2013-02-27) * alinéa [0016] - alinéa [0072]; figures 1-9 *	1-15	H04N5/30 H04N5/217 H04N1/56 G06T11/00 G06F17/30
A,D	EP 2 160 904 A2 (CENTRE NAT RECH SCIENT [FR]; UNIV JOSEPH FOURIER [FR]) 10 mars 2010 (2010-03-10) * alinéa [0045] - alinéa [0091]; figures 1, 2a, 2b *	1-15	
A	TRUSSELL H J ET AL: "Mathematics for Demosaicking", IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 11, no. 4, 1 avril 2002 (2002-04-01), XP011074253, ISSN: 1057-7149 * le document en entier *	1-15	
A	US 7 149 262 B1 (NAYAR SHREE K [US] ET AL) 12 décembre 2006 (2006-12-12) * colonne 6, ligne 34 - colonne 30, ligne 43; figures 1-31 *	1-15	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)  H04N G06T
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
5 novembre 2018		Seytter, Fritz	
<b>CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</b> X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1851978 FA 853238**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du 05-11-2018

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 2561681      A1	27-02-2013	EP 2561681 A1	27-02-2013
		FR 2959092 A1	21-10-2011
		JP 5736447 B2	17-06-2015
		JP 2013526170 A	20-06-2013
		US 2013258114 A1	03-10-2013
		WO 2011131898 A1	27-10-2011
-----			
EP 2160904      A2	10-03-2010	EP 2160904 A2	10-03-2010
		FR 2917559 A1	19-12-2008
		JP 6104985 B2	29-03-2017
		JP 2010531560 A	24-09-2010
		JP 2013243750 A	05-12-2013
		JP 2015188240 A	29-10-2015
		US 2010253818 A1	07-10-2010
		WO 2009007543 A2	15-01-2009
-----			
US 7149262      B1	12-12-2006	AUCUN	
-----			

EPO FORM P0465

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82