

# 30 ans de démosaïçage - 30 years of demosaicing

David Alleysson

Mots clefs : caméras numériques couleur mono circuit, interpolation,

Keywords : single-chip digital cameras, interpolation

14 février 2005

## Résumé

Cet article propose une revue de trente années de développement des algorithmes de démosaïçage utilisés dans les caméras numériques pour la reconstruction des images couleurs. La plupart des caméras numériques actuelles utilisent un seul capteur devant lequel est placée une matrice de filtres couleurs. Ce capteur échantillonne par conséquent une seule couleur par position spatiale et un algorithme d'interpolation est nécessaire pour la définition d'une image couleur avec trois composantes par position spatiale. Cet article montre que l'ensemble des techniques du traitement du signal et des images a été utilisé pour résoudre ce problème. Aussi, une nouvelle méthode proposée récemment par l'auteur et collaborateurs est décrite. Cette méthode, basée sur un modèle d'échantillonnage couleur par les cônes de la rétine, révèle la nature de l'échantillonnage spatio-chromatique dans les caméras couleur à un seul capteur.

This paper proposes a review of thirty years of the development of demosaicing algorithms used in digital camera for the reconstruction of color image. Most recent digital camera used a single sensor in front of a color filter array is placed. This sensor sample a single chromatic value per spatial position and an interpolation algorithm is needed for the definition of a color image with three components per spatial position. This article shows that the whole signal and image processing technics have been used for solving this problem. Moreover, a new method proposed recently by the author and collaborators is described. This method based on a model of chromatic sampling by the cones in the retina highlights the nature of spatio-chromatic sampling in digital camera with single sensor.

## 1 Introduction

L'homme a toujours cherché à figer les images dans le temps pour garder une trace précise des événements importants que sa propre mémoire ne pouvait conserver intacte. Après la peinture et les procédés photographiques, aujourd'hui les images sont numériques, stockées sur des supports presque inaltérables pour lesquels une copie intacte peut toujours être réalisée. De même aujourd'hui, plutôt que des images fixes, il est possible de stocker des séquences d'images sur le même type de support sans altération à la copie.

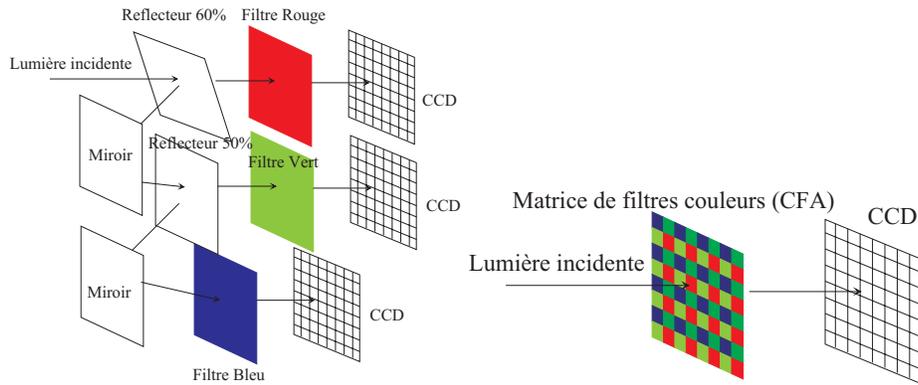


FIG. 1 – (a) Schéma d’une caméra ”tri-ccd”. (b) Schéma d’une caméra ”mono-ccd” avec une matrice de filtres couleurs

Cependant, les techniques d’acquisition de telles images et, plus particulièrement en couleur, ont nécessité de nombreuses études et évolutions pour permettre de fabriquer des produits utilisables par le grand public à des prix raisonnables et fournissant une qualité d’image suffisante. Cet article fait une revue des méthodes mises en œuvre pour l’acquisition des images fixes ou animées par des caméras utilisant un seul capteur (single-chip), ayant permis la réduction des coûts des caméras et l’accès au grand public.

La définition d’une image numérique couleur requiert un vecteur à trois composantes à chaque position spatiale, généralement appelées R, G et B (pour Red, Green, Blue en anglais) afin de simuler la trivalence de la perception des couleurs chez l’homme. A partir d’une telle donnée numérique, il est possible d’afficher une image sur un écran en modulant l’intensité d’excitation de trois phosphores sur chaque pixel de l’écran. De même, il est possible de reproduire par impression sur un support papier les couleurs mesurées dans la scène naturelle.

On a longtemps pensé que l’acquisition d’une image numérique couleur requierait trois capteurs, chacun sensible à une gamme de longueur d’onde R, G et B. Ainsi, certaines caméras numériques sont composées de trois capteurs (généralement CCD) devant lesquels est placé un filtre de sélection du spectre dans les gammes de rouge, vert et bleu. Pour distribuer la lumière sur ces trois capteurs, des miroirs semi réfléchissants décomposent le flux lumineux sur différentes voies. Un schéma de caméra numérique, dite ”tri-CCD”, est représenté sur la figure 1(a).

Bien que cette configuration fonctionne parfaitement, elle nécessite des contraintes d’alignement difficiles à réaliser, et surtout coûte cher puisque la majeure partie du prix d’une caméra est constitué du coût du capteur. Pour pallier ces contraintes, plusieurs méthodes ont été proposées, utilisant un seul capteur au lieu de trois. Une de ces méthodes utilise un disque composé de plusieurs filtres de couleur tournant devant le capteur de manière à filtrer une partie du spectre. La rotation du disque est synchronisée avec le balayage de l’acquisition des valeurs de pixels et permet d’acquérir successivement les valeurs rouges, vertes et bleues à chaque position spatiale. Mais le temps d’acquisition des trois plans couleurs de l’image est alors trois fois supérieur et cette méthode a été abandonnée pour les caméras. Un principe similaire est cependant utilisé aujourd’hui pour la projection des images sur écran (DLP de Texas Instrument commercialisé dans les projecteurs JVC). Une autre approche, propose de juxtaposer à la surface du capteur un film transparent composé d’une alternance de bandes verticales ayant des sensibilités différentes. Un second film transparent similaire est juxtaposé angulairement au premier [Macovski68]. De cette manière, on crée plusieurs sites différents de sensibilité à la longueur d’onde qui correspondent à la juxtaposition des éléments de filtres dans les bandes. Cette technique est difficile à produire économiquement lorsque l’on veut une grande densité de pixels. Une méthode utilisant des bandes de trois ou quatre filtres a été également mise

en oeuvre. Dans ces systèmes, les filtres sont alignés verticalement et le balayage de l'image est réalisé horizontalement. Cette méthode donne une période d'échantillonnage des couleurs différente suivant la direction horizontale ou verticale. Une dernière approche ("dot" scanning system) utilise des éléments de sensibilité différentes, arrangés en triade [Banning54] ou en répétition de quatre éléments [Banning56], imitant la structure des phosphores d'un écran CRT. Mais le coût de fabrication du nombre d'éléments requis pour avoir suffisamment de détails n'a pas rendu cette approche satisfaisante.

C'est en 1976 que Bruce Bayer [Bayer76], de la compagnie Kodak, proposa un nouveau système d'acquisition d'images numériques couleurs. Il proposa de disposer devant le capteur de large bande de sensibilité à la longueur d'onde une matrice de filtres couleurs (Color Filter Array - CFA). Contrairement aux bandes de filtres proposées précédemment, la matrice permet une même période d'échantillonnage horizontale et verticale de chacune des trois couleurs. Pour cela, une des couleurs doit apparaître deux fois dans le motif de répétition de taille 2x2. La Figure 1(b) montre un schéma de construction de caméra avec un seul capteur, "mono-CCD", avec une matrice de filtre couleur de Bayer. Pour ce type de capteur, l'image est formée à l'acquisition d'une mosaïque de couleur. C'est la raison pour laquelle l'algorithme de reconstruction de l'image couleur est appelé démosaïçage où démosaïquage (demosaiicing ou demosaicking en anglais).

La matrice de filtre couleur proposée par Bayer est composée d'une alternance d'éléments rouges et verts une ligne sur deux, et d'une alternance d'éléments verts et bleus sur les autres lignes, de telle sorte que les éléments verts soient disposés en quinconce et en nombre deux fois supérieur aux éléments rouges et bleus. L'idée défendue par Bayer et perpétrée depuis sans aucune remise en cause est que le doublement de pixels sensibles au vert permet une meilleure reconstruction de la luminance. En effet, la sensibilité lumineuse de l'observateur humain à la longueur d'onde n'est pas constante et suit la loi de visibilité photopique,  $V(\lambda)$  (voir l'ouvrage de R. Sève [Seve96]). Or, cette loi montre que la sensation lumineuse est plus importante dans les longueurs d'ondes moyennes, autour de 550 nm et décroît de chaque côté de cette valeur. Il s'avère que cette longueur d'onde produit une sensation de couleur verte. Ainsi, Bayer émet l'idée que la population d'échantillons sensibles à la longueur d'onde proche de 550 nm augmentera la définition spatiale de la luminance. Nous verrons que cet argument est erroné et que la fonction de visibilité photopique, utile pour déterminer les composantes chromatiques de la sensibilité humaine à la luminance, ne relate en rien l'information spatiale de luminance. Comme conséquence, nous verrons qu'une matrice de filtre couleur composée de deux fois plus de bleus que de rouges et de verts permettra une meilleure reconstruction de l'image. Nous verrons aussi que les artefacts de reconstruction peuvent parfaitement s'expliquer en terme d'aliasing entre la luminance et la chrominance dans le spectre de Fourier de l'image CFA. Enfin, nous verrons que la proposition de Bayer en 1976, et particulièrement, l'arrangement spatial des filtres de couleur dans la matrice est optimale puisqu'elle réduit le risque d'aliasing.

La plupart des algorithmes développés en traitement du signal et des images ont trouvé application dans ce problème de démosaïçage. Il est donc très instructif de suivre l'histoire de l'évolution de ces algorithmes, puisqu'elle est parallèle à l'histoire du traitement numérique du signal et des images. D'autre part, ce problème dépasse largement le cadre du traitement d'image. En effet, ce type de problématique concerne aussi la vision où trois types de cônes sensibles à trois longueurs d'ondes différentes sont entrelacés dans la rétine. Comprendre la représentation des données spatio-chromatiques dans le système visuel reste un défi, notamment pour expliquer la dépendance de la perception des couleurs en fonction de l'environnement spatial. Il est certain que les méthodes de démosaïçage apporteront beaucoup pour la compréhension des mécanismes de vision spatio-chromatique.



FIG. 2 – (a) Image utilisée pour la simulation. (b) Image CFA, les pixels dans les plans RGB de l’image originale sont supprimés pour simuler un échantillonnage par une matrice de Bayer. L’image apparaît verdâtre parce qu’il y a deux fois plus de pixels verts que de rouges et de bleus dans la matrice de Bayer. (c) Numérotation de la matrice de Bayer.

## 2 Historique des algorithmes de démosaïçage

Dans cette partie, nous allons détailler plusieurs grandes familles d’algorithmes utilisés pour le démosaïçage. Le lecteur pourra trouver plusieurs articles de références en anglais pour compléter l’éventail [Cok94, Adams95, Adams98-2, Longere02, Muresan02, Ramanath02, Lu03, Gunturk04]. Il est impossible de détailler toutes les méthodes proposées dans la littérature, bien que toutes apportent un élément de réponse et un éclairage sur la nature de l’espace spatio-chromatique. Le choix et la classification des méthodes sont donc arbitraires et sous la responsabilité de l’auteur.

Chaque présentation d’algorithme est accompagnée d’un figure illustrant la qualité de la reconstruction. Pour les simulations, nous avons utilisé une image de la base de données Kodak, ”lighthouse”, issue du format Pcd, extraite en résolution  $384 \times 256$  et convertie en nombre flottant entre 0 et 1. Cette image, à l’origine composée de trois couleurs par pixels, est sous échantillonnée spatialement pour obtenir une image avec une seule couleur par pixel, en accord avec l’arrangement des couleurs dans la matrice de filtres couleur de Bayer (Figure 2(a)(b)). Cette image sera appelée image CFA dans la suite de l’article. Il est important de noter que les résultats de la simulation dépendent de la façon dont l’image CFA est obtenue, sa résolution, mais aussi l’ordre des couleurs dans la décomposition. Dans cet article, nous avons choisi d’utiliser le pixel en haut à gauche de l’image de couleur bleu, le pixel à droite et de dessous est vert, le pixel de coordonnées (2,2) est rouge (Figure 2(c)).

L’application utilisée est Matlab et la programmation des algorithmes est sous la seule responsabilité de l’auteur et collaborateurs. Avec chacune des simulations, nous donnerons le rapport signal sur bruit et une analyse comparative basée sur une base de 23 images est disponible en Section 5.

## 2.1 Avant le démosaïçage

Dans la définition du brevet de Bayer, il n'est pas mention d'algorithmes pour la reconstruction de l'image couleur à partir de l'image CFA extraite du capteur. L'utilisation du CFA découle de la technologie de caméras pour la télévision et du format NTSC aux Etats-Unis. Implicitement, si le nombre de lignes dans le capteur correspond au nombre de lignes du format NTSC (525), il suffirait d'effectuer de simples conversions pour produire un signal de luminance (Y) compatible avec le format NTSC à partir du signal vert (G) extrait du capteur CFA. De plus, le nombre de pixels couleur rouge et bleu correspondrait alors, à peu près, à la définition de la largeur de bande de la chrominance (I,Q) définie dans le format NTSC. C'est sans doute la raison pour laquelle le démosaïçage n'a pas été introduit directement après le brevet de Bayer, mais des années plus tard, lorsque les formats numériques sont devenus l'outil grand public pour l'acquisition d'images ou de films dans de nombreux formats de taille d'image différents.

Peu après le brevet de Bayer, Dillon [Dillon77], également de la compagnie Kodak, proposa d'autres matrices de filtres couleurs pour lesquelles les couleurs R et B sont présentes même si l'on considère seulement les lignes paires ou impaires de la matrice. La raison de cette nouvelle proposition est que, dans la matrice de Bayer, lorsqu'on réalise une mesure de l'image en entrelacé (on mesure en deux passes les 525 lignes de l'image pour produire alternativement une image de 212 puis 213 lignes en mesurant une ligne sur deux), un papillotement apparaît sur la séquence vidéo pour les pixels rouges et bleus échantillonnés une fois sur deux. En utilisant les matrices de Dillon dans lesquelles chacune des trois couleurs est présente sur les lignes paires ou impaires, le papillotement est réduit. La matrice de Bayer n'a donc pas connu tout de suite le succès qu'elle a aujourd'hui. Cependant, avec les matrices de Dillon, la période d'échantillonnage de chacune des couleurs n'est pas la même en horizontale et verticale, et supérieure à celle de la matrice de Bayer.

## 2.2 Méthodes simples

Les premiers travaux pour l'amélioration de l'image numérique couleur acquise par un seul capteur sont apparus juste avant les années 80. On considère, à cette époque, le problème de démosaïçage comme un problème d'interpolation pour lequel une séparation préalable de l'image CFA en trois canaux de couleurs contenant des zéros aux pixels manquants est réalisée. Les traitements du signal vidéo sont réalisés avec des éléments électroniques discrets utilisant des retardateurs et des additionneurs. Adcock et Skaggs [Adcock77], de la société Texas Instrument, proposent une méthode d'interpolation linéaire sur les lignes de l'image. Cependant, dans plusieurs travaux, la parenté de l'interpolation linéaire est attribué à Cok [Cok86-1]. Plus tard, Dillon et Bayer [Dillon79-1] propose une méthode appelée "box-car" pour laquelle la valeur du pixel est maintenue à la position manquante lors du balayage des lignes pour la lecture de la valeur des pixels. Cette méthode s'apparente à une interpolation par copie de pixels.

A titre d'illustration, et dans le cas de la matrice de Bayer (contrairement au travaux cités précédemment), nous montrons ces méthodes très simples pour remplir les pixels manquants dans la matrice CFA. La méthode de copie de pixels est illustrée sur la figure 3. La méthode d'interpolation linéaire peut s'appliquer dans les deux dimensions, horizontale et verticale (dans ce cas on dit bilinéaire) si l'on dispose d'un processeur de signal et d'une mémoire évoluée permettant de mémoriser plus d'une ligne et de réaliser les traitements après coup. C'est justement à partir du brevet de Cok en 86 que commencent à apparaître des systèmes de caméras disposant d'un processeur, d'une mémoire et d'un bus de transfert de données. Donc, contrairement au traitement en ligne proposé précédemment, l'interpolation bilinéaire consiste à interpoler linéairement les pixels manquants à partir des pixels voisins horizontaux et verticaux existants. Par exemple pour interpoler

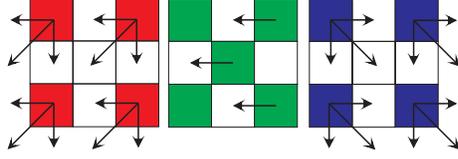


FIG. 3 – Illustration de la méthode de copie de pixels.



FIG. 4 – (a) Méthode d'interpolation par copie de pixels (22.85dB). (b) Par interpolation bilinéaire (25.87dB)

le pixel bleu à la position (2,2) et le pixel vert à cette même position, on applique les formules suivantes :

$$B_{22} = \frac{B_{11} + B_{13} + B_{31} + B_{33}}{4} \quad G_{22} = \frac{G_{12} + G_{21} + G_{23} + G_{32}}{4} \quad (1)$$

Comme le pas d'échantillonnage de chacune des couleurs est régulier dans le CFA de Bayer, il est possible d'appliquer l'interpolation bilinéaire à l'aide de filtres de convolution. Par exemple le filtre  $\mathbf{F}_G$  proposé dans l'équation (2) permet l'interpolation des pixels verts manquants par convolution de ce noyau de filtre avec la matrice des pixels verts dans laquelle les pixels manquants sont remplis par des zéros. De même, le noyau du filtre de convolution  $\mathbf{F}_{RB}$  permet l'interpolation bilinéaire des plans rouge et vert.

$$\mathbf{F}_G = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} / 4 \quad \mathbf{F}_{RB} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} / 4 \quad (2)$$

La figure 4(a)(b) montre le résultat de l'interpolation par la copie de pixels et par l'application des noyaux de filtres de convolution de l'équation (2) pour l'interpolation bilinéaire. Nous voyons clairement deux types d'artefacts qui apparaissent lors de l'application de ces algorithmes, un lissage de l'image ou flou et l'apparition de fausses couleurs. L'algorithme de copie de pixels n'apporte pas trop de flou, mais plutôt un cisaillement des contours, ainsi que de nombreuses fausses couleurs. L'algorithme d'interpolation bilinéaire génère un flou flagrant, mais est moins sujet à l'apparition de fausses couleurs.

## 2.3 Méthodes optiques

Même si le nombre de lignes de la caméra est compatible avec le format de codage et le nombre de lignes à la restitution, comme pour l'exemple du Bayer CFA et du format NTSC, il subsiste néanmoins l'apparition d'artefacts dans les images acquises. Ce problème d'artefacts est du à la violation du théorème d'échantillonnage de Whittaker-Shannon qui stipule que la fréquence d'échantillonnage doit être au moins le double de la fréquence maximale du signal continu à échantillonner pour permettre une représentation parfaite de l'image continue. Or, la fréquence maximale du signal lumineux pour des scènes naturelles n'est pas défini mais est limité dans les caméras grâce aux propriétés de l'optique. Pritchard [Pritchard71] a proposé d'utiliser un limiteur de fréquence dans le chemin optique de la caméra. Ce limiteur de fréquence est basé sur un filtre biréfringent [Evans49] capable de séparer la lumière incidente en plusieurs raies parallèles et permettre ainsi le contrôle de la fréquence maximale du signal. Cette méthode permet de réduire les fausses valeurs de pixels dans les caméras avec un seul capteur. Elle permet aussi de considérer des caméras de résolutions différentes du format NTSC puisque les propriétés optiques peuvent être adaptées à la fréquence d'échantillonnage.

Mais, dans les caméras avec un seul capteur, la période d'échantillonnage horizontale, verticale et diagonale de chacune des couleurs n'est pas identique et le risque d'aliasing est donc fort. D'autre part, après la proposition de Bayer, il paraît évident que le doublement de pixels verts dans la matrice est nécessaire. Greivenkamp [Greivenkamp86, Greivenkamp90] propose un filtre spatial optique permettant de moduler la fréquence d'une couleur par rapport aux autres. Il utilise ce filtre avec une matrice composée de colonnes de même couleur et un multiplexage des couleurs en ligne suivant le motif GRGB. Ainsi, il peut utiliser la propriété de doublement des pixels verts proposée par Bayer et limiter le risque d'aliasing.

Même si, dans le texte de son brevet, Greivenkamp annonce qu'avec cette méthode, il est possible de réaliser des filtres pour lesquelles la fréquence horizontale et verticale peut être contrôlée indépendamment pour chaque bande de longueur d'ondes, il semble que ce ne soit pas facilement réalisable. En effet, aucune proposition n'a été faite dans le cas de la matrice de Bayer.

En 1986, Cok, [Cok86-1] propose une méthode, qui sera détaillée dans la section 2.4, utilisant un filtre optique biréfringent et une technique pour l'interpolation des pixels manquants. Ensuite, Weldy et Kristy [Weldy87] proposent une méthode d'interpolation optimisée en fonction du filtrage optique. Cette méthode est efficace pour une répétition de pixels verts de deux ou trois de suite sur une ligne mais n'est pas efficace dans le cas de la matrice de Bayer. Weldy [Weldy89] montre une comparaison favorable de sa méthode avec celle de Cok, mais celle de Cok est utilisable avec la matrice de Bayer.

Finalement, en 1994, Cok justifie l'abandon des filtres optiques par le fait que ces filtres sont difficiles à fabriquer, et leur propriété de séparation spatiale est bien contrôlée uniquement pour les longueurs d'onde monochromatiques. Ils ont tendance à trop filtrer spatialement les images et surtout, des méthodes d'interpolation performantes ont été trouvées. Pour toutes ces raisons les méthodes de filtrage optiques ont été abandonnées et les chercheurs se sont concentrés sur les méthodes de reconstruction, le démosaïçage. Le seul élément optique à considérer désormais dans les caméras numériques et la propriété de filtrage passe-bas de la lentille de focalisation.

## 2.4 Interpolation basée sur la constance de teintes

La première idée fondamentale pour l'amélioration de l'interpolation a été développée par Cok et publiée conjointement avec la méthode optique proposée par Greivenkamp [Cok86-1]. En parallèle, il publie un autre brevet qui détaille mieux la méthode et montre qu'elle s'applique à plusieurs types de caméras, notamment celle utilisant une matrice de Bayer [Cok87].



FIG. 5 – (a) Méthode de constance des teintes (28.55dB) (b) Méthode de reconnaissance des formes (30.39dB)

Notons également que ce brevet décrit une méthode utilisant un voisinage horizontal et vertical pour l'interpolation. La contrainte de traitement en ligne n'est plus nécessaire grâce à un système de mémoire et de processeur reliés par un bus de transfert de données.

Cok propose d'interpoler la teinte, plutôt que chacune des couleurs prise séparément. L'idée intuitive est que la teinte ne varie pas à la surface d'un objet. Donc la méthode devrait diminuer l'apparition de fausses couleurs. La teinte est calculée comme le rapport entre Rouge et Vert ( $R/G$ ) et Bleu et Vert ( $B/G$ ). L'algorithme est alors le suivant. On commence par interpoler les pixels verts manquants par la méthode d'interpolation bilinéaire proposée précédemment (section 2.2). Puis on calcule pour les pixels rouges et bleus existants les teintes  $R/G$  et  $B/G$ . On interpole ensuite de manière bilinéaire ces teintes, puis on multiplie par les valeurs de  $G$  pour obtenir les valeurs de  $R$  et de  $B$  correspondantes.

Par exemple, pour l'interpolation du pixel bleu à la position (2,2) on a :

$$B_{22} = G_{22} \frac{\frac{B_{11}}{G_{11}} + \frac{B_{13}}{G_{13}} + \frac{B_{31}}{G_{31}} + \frac{B_{33}}{G_{33}}}{4} \quad (3)$$

Dans une deuxième version, Cok [Cok87] propose d'utiliser le logarithme de l'intensité des pixels, pour ramener la division à une soustraction. En pratique, grâce à la fonction non linéaire de l'intensité des pixels dans une image, cette méthode par soustraction pour le calcul des teintes donne de bons résultats. En particulier, pour l'image que nous utilisons, elle résulte même en une meilleure reconstruction. C'est donc celle-ci que nous utilisons pour implémenter cet algorithme.

La Figure 5(a) montre le résultat de l'interpolation par la méthode de constance de teinte. Cette méthode est bien plus performante que les deux précédentes, mais continue de présenter des artefacts. Cet algorithme est fondamental à plusieurs titres. D'une part, il est réutilisé dans de nombreuses autres propositions ([Laroche94, Hibbard95, Kimmel99]...). D'autre part, ce qui fait son originalité et son pouvoir historique est qu'à partir de cette proposition, la plupart des algorithmes proposés ne vont plus utiliser de manière indépendante les canaux de couleurs, mais vont exploiter les relations entre les canaux et plus particulièrement leur intercorrélacion.

## 2.5 Reconnaissance de forme

En parallèle de la méthode d'interpolation de teinte, Cok [Cok86-2] propose une méthode d'interpolation basée sur la reconnaissance des formes. En effet, l'hypothèse de constance de teinte n'est plus valide à la frontière entre les objets. Ce problème est particulièrement important et a connu de nombreuses propositions de solution. L'objectif de cette nouvelle méthode est de classifier plusieurs types de formes de voisinage et de réaliser une interpolation différente suivant le type de voisinage. D'après lui, cette méthode permet de repousser les erreurs d'interpolation dans les zones texturées tel que l'observateur humain ne peut les voir. Ceci étant, cette méthode est avant-gardiste de nombreuses autres, tâchant d'améliorer l'interpolation des pixels verts supposés responsables de l'échec partiel de la méthode de constance des teintes. L'ensemble de ces méthodes pour lesquelles l'algorithme s'adapte aux propriétés locales de l'image sont appelés adaptatifs.

Le texte original du brevet de Cok [Cok86-2] est difficile à interpréter, nous avons donc plutôt utilisé celui de la référence suivante [Cok94], qui implémente le même algorithme. Adams [Adams95] décrit également cette méthode. Cok propose de classer les voisinages 3x3 en contours, bandes et coins (voir Figure 6). Pour interpoler le pixel vert  $X$  manquant, on applique la méthode suivante :

1. Calculer la moyenne  $m$  des quatre plus proches voisins (voir Figure 6) d'un pixel vert manquant. Classifier chacun de ces pixels comme inférieur (L), supérieur (H) ou égal (E) à la moyenne. Soient  $\alpha \geq \beta \geq \gamma \geq \delta$ , les quatre pixels ordonnés en décroissance de leurs valeurs, calculer  $M$  égale  $(\beta + \gamma)/2$  la médiane des quatre valeurs.
2. Classifier le pixel à interpoler comme contour, bande ou coin de la manière suivante :
  - Si les quatre voisins sont formés de 3 pixels H et 1 L ou 3 L plus 1 H, le voisinage est un contour.
  - Si le voisinage est composé de 2 H et 2 L adjacent deux à deux, c'est un coin.
  - Si le voisinage est composé de 2 H et 2 L opposés deux à deux, c'est une bande.
  - Dans les cas où un ou plus des pixels est classifié égal à la moyenne, c'est une bande si 2 H ou 2 L sont opposés deux à deux, sinon, c'est un contour.
3. Pour un contour  $X = M$
4. Pour une bande, soit  $x = 2M - S$ ,  $X = CLIP_{\beta}^{\gamma}(x)$
5. Pour un coin, soit  $x = M - (S' - M)/4$ ,  $X = CLIP_{\beta}^{\gamma}(x)$

Où  $S$ , est la moyenne des huit pixels proches des quatre premiers (label A de la Figure 6).  $S'$  est la moyenne de quatre des huit pixels proches suivants (label C de la Figure 6). Et  $X = CLIP_{\beta}^{\gamma}(x)$  définit par :

$$X = \begin{cases} x & \text{si } \gamma \leq x \leq \beta \\ \beta & \text{si } \beta \leq x \\ \gamma & \text{si } x \leq \gamma \end{cases}$$

Cet algorithme est utilisé uniquement pour les pixels verts, les pixels rouges et bleus sont interpolés par la méthode de constance de teinte. Il en est de même pour la plupart des algorithmes suivants. En effet, il est supposé que l'amélioration des algorithmes de mosaïçage réside principalement dans l'amélioration de l'interpolation des pixels verts. Les plans rouge et bleu sont suffisamment bien reconstruits avec la méthode de constance de teintes.

Une illustration du résultat de l'interpolation avec cette méthode est montré sur la Figure 5(b). Les résultats sont meilleurs que la méthode de constante des teintes basée sur une interpolation bilinéaire du vert. Cependant, les résultats

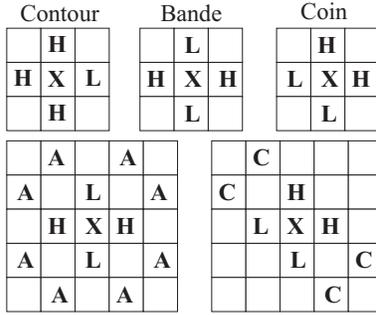


FIG. 6 – Illustration des formes proposées par Cok, ainsi que de l'utilisation des huit voisins dans le cas d'une bande et d'un coin

ne sont pas à la hauteur des suppositions de Cok. Plus tard, il a proposé des méthodes d'interpolations linéaires des plans rouges et bleus utilisant le plan vert comme correcteur [Cok91-1, Cok91-2] qui ne sont pas détaillées ici.

L'utilisation du filtrage médian pour l'interpolation a également été proposée par Freeman [Freeman88-1, Freeman88-2] avec un algorithme beaucoup plus simple (quoique plus long à exécuter avec Matlab) et de bons résultats de rendu. Dans sa version, Freeman propose d'interpoler linéairement les pixels rouges, verts et bleus pour remplir les matrices, puis d'appliquer un filtrage médian de voisinage  $3 \times 3$  sur les différences de couleurs. Dans notre implémentation, nous utilisons la médiane des pixels voisins comme valeur interpolée. Cela nécessite de considérer deux cas pour le rouge et le bleu, car si le pixel manquant est vert ou non, le voisinage change.

Les pixels verts manquants sont tout d'abord interpolés en utilisant la médiane des quatre pixels verts voisins. Ensuite, les différences de couleurs rouge moins vert et bleu moins vert sont calculées aux positions des pixels rouges et bleus existants puis interpolé comme la médiane des quatre pixels voisins. Le résultat de cet algorithme est présenté à la Figure 7(a).

Acharya [Acharya00] a proposé récemment un algorithme utilisant le filtrage médian des pixels voisins pour la classification et l'interpolation. Cette méthode n'est pas étudiée dans cet article.

## 2.6 Interpolation directionnelle utilisant le gradient

L'algorithme de reconnaissance des formes présenté au paragraphe précédent est assez complexe et nécessite de nombreux traitements pour interpoler chaque pixel. Pour simplifier la classification et les différentes méthodes d'interpolation, Hibbard [Hibbard95] utilise le gradient horizontal et vertical autour du pixel manquant, calculé à partir des pixels voisins existants. L'idée est de réaliser une interpolation le long des contours et d'éviter une interpolation à travers eux. Par exemple, l'interpolation du pixel vert à la position (4,4), est la suivante :

1. Calcul du gradient horizontal et vertical  $\Delta H = |G_{43} - G_{45}|$  et  $\Delta V = |G_{34} - G_{54}|$

2. Si  $\Delta H > \Delta V$

$$G_{44} = (G_{34} + G_{54}) / 2$$

Sinon, si  $\Delta H < \Delta V$

$$G_{44} = (G_{43} + G_{45}) / 2$$

Sinon,

$$G_{44} = (G_{43} + G_{45} + G_{34} + G_{54}) / 4$$



FIG. 7 – (a) Méthode de filtrage médian proposé par Freeman (30.54dB)(b) Méthode d’interpolation suivant la direction du gradient proposé par Hibbard (30.38dB).

Il est important de noter que les méthodes utilisant le gradient sont très utilisées dans le démosaïçage. Ces méthodes sont judicieuses puisqu’à chaque pixel manquant dans la matrice de Bayer, le gradient suivant deux directions est parfaitement connu à partir des pixels existants. Le résultat de cette méthode est présenté à la Figure 7(b).

Une dérivation de cette méthode est proposée dans [Laroche94], où le gradient au pixel vert manquant est estimé à partir d’un voisinage de pixels rouge ou bleu suivant la couleur du pixel présent à la position verte manquante correspondante. Par exemple, pour l’interpolation du pixel vert à la position (4,4) il suffit de changer la façon dont le gradient est calculé :

1. Calcul du gradient horizontal et vertical  $\Delta H = |(R_{42} + R_{46}) / 2 - R_{44}|$  et  $\Delta V = |(R_{24} + R_{64}) / 2 - R_{44}|$

Le résultats de cette méthode de calcul est présenté sur la Figure 8(a).

## 2.7 Interpolation directionnelle par le gradient corrigé du Laplacien

Hamilton et Adams [Hamilton97] proposent d’utiliser d’autres estimateurs pour la classification et l’interpolation des pixels. Dans cette implémentation, ils utilisent un calcul de gradient sur les pixels verts et de Laplaciens sur les pixels rouges ou bleus. Leur méthode pour l’interpolation du pixel vert  $G_{44}$  est basée sur l’algorithme suivant :

1. Calculer  $\Delta H = |G_{43} - G_{45}| + |2R_{44} - R_{42} - R_{46}|$  et  $\Delta V = |G_{34} - G_{54}| + |2R_{44} - R_{24} - R_{64}|$

2. Si  $\Delta H > \Delta V$

$$G_{44} = (G_{34} + G_{54}) / 2 + (2R_{44} - R_{24} - R_{64}) / 4$$

3. Sinon, si  $\Delta H < \Delta V$

$$G_{44} = (G_{43} + G_{45}) / 2 + (2R_{44} - R_{42} - R_{46}) / 4$$

4. Sinon,

$$G_{44} = (G_{43} + G_{45} + G_{34} + G_{54}) / 4 + (4R_{44} - R_{42} - R_{46} - R_{24} - R_{64}) / 8$$

Dans ce brevet, ils proposent également une méthode directionnelle pour l’interpolation des pixels rouges et bleus. Nous appliquons plutôt la méthode de constance des teintes. Un exemple d’interpolation avec cette méthode est donnée à la



FIG. 8 – (a) Méthode d’interpolation suivant la direction du gradient proposé par Laroche et al. (31.81dB). (b) Méthode proposée par Hamilton et Adams, reconnaissance de formes par gradient vert corrigé du Laplacien de rouge ou bleu (34.20dB).

Figure 8(b). Nous voyons que cette méthode donne de très bons résultats pour un temps de calcul raisonnable.

Adams et Hamilton [Adams96, Adam97-1] ont ensuite proposé plusieurs méthodes plus sophistiquées, à partir de celle-ci, proposant alors plusieurs autres types de classifications et d’interpolateurs. Ces méthodes sont basées sur l’intégration des caractéristiques de l’algorithme de constance de teintes. Plus tard, Adams [Adams97-2, Adams98-1] donne une démonstration de l’utilisation du Laplacien comme correction de l’interpolateur linéaire. Sa démonstration est forte intéressante parce qu’elle décrit un modèle mathématique du voisinage des couleurs dans le CFA qui fait intervenir la représentation en fréquences. Finalement, ils ont également proposé récemment [Hamilton00] un nouvel algorithme basé sur un lissage de l’image, une classification et une correction utilisant des filtres de convolution. Cette méthode n’est pas traitée dans cet article.

### 3 Généralisation du démosaïçage

A partir des années 90, la définition d’une caméra numérique comme micro-ordinateur embarqué avec processeur généraliste, bus de données, mémoire vive, de masse, système d’exploitation et système de gestion de fichiers se généralise. Les contraintes de traitement embarqué en ligne et temps-reel sont oubliées laissant libre court à l’apparition de nouveaux algorithmes dont la priorité est la meilleure reconstruction possible de l’image en dépit parfois de la vitesse de calcul. Nous avons choisi de séparer la présentation de ces algorithmes, même si ceux-ci utilisent souvent des résultats décrits précédemment et forment une continuité logique.

Il existe deux catégories d’algorithmes dans cette génération. Les algorithmes linéaires pour lesquels le traitement correspond à un filtrage linéaire ou convolution avec un filtre et les algorithmes non linéaires ou adaptatifs pour lesquels une implémentation par convolution n’est pas possible. L’avantage des algorithmes linéaires est qu’il sont facile à implémenter, la complexité étant reportée dans le calcul du filtre. De plus, les processeur modernes possèdent généralement des instructions spécialisé pour la convolution, laquelle s’effectue en un cycle de processeur par élément du filtre par pixel de

l'image. L'avantage des algorithmes non linéaires est la qualité de la reconstruction par l'utilisation d'a priori sur les images, d'itérations ou de propriétés locales dans les images.

### 3.1 Interpolation linéaire à pondération variable

Les méthodes précédentes de reconnaissance de forme ou d'interpolation directionnelles ont un temps de calcul qui dépend de l'image considérée puisque l'algorithme est basée sur des conditions, lesquelles peuvent prendre un temps d'exécution différent. D'autre part, il y a une séparation entre la partie classification faite en amont et la partie interpolation qui nécessite une double lecture de l'image. Pour contourner ces effets, il a été proposé d'utiliser des méthodes d'interpolation linéaires généralisées qui intègrent la classification et l'interpolation. Par exemple pour interpoler le pixel vert à la position (4,4) on applique :

$$G_{44} = \frac{E_{43}G_{43} + E_{45}G_{45} + E_{34}G_{34} + E_{54}G_{54}}{E_{43} + E_{45} + E_{34} + E_{54}} \quad (4)$$

Où  $E_{ij}$  est un facteur de pondération calculé sur l'image. Si ce facteur correspond à un estimateur de contour au point considéré, l'interpolation s'adapte automatiquement au contour de l'image. Cette démarche est adoptée par de nombreuses études. En particulier, [Lu03] propose une implémentation pour laquelle un principe de constante de teinte est réalisé. D'autre part, [Li01] décrit une méthode où l'estimation des seuils correspond à un calcul de la covariance dans les images à plus basses résolutions. Ces méthodes ne seront pas décrites dans cet article.

Dans son article, Kimmel [Kimmel99] propose une fonction de mesure de contour pour  $E_{i,j}$ , construite à partir des gradients. Pour l'interpolation d'un pixel  $P^1$  à la position (i,j), on utilise la formule de l'Equation 4 précédente, avec :

$$E_{i+k,j+\ell} = \frac{1}{\sqrt{1 + D(P_{i,j})^2 + D(P_{i+k,j+\ell})^2}} \quad \text{avec } k \in [-1 \ 0 \ 1] \text{ et } \ell \in [-1 \ 0 \ 1] \quad (5)$$

avec  $D$ , les gradients horizontaux, verticaux et diagonaux définis par :

$$D_x(P_{i,j}) = \frac{P_{i,j-1} - P_{i,j+1}}{2} \quad D_y(P_{i,j}) = \frac{P_{i-1,j} - P_{i+1,j}}{2} \quad D_{xd}(P_{i,j}) = \frac{P_{i-1,j+1} - P_{i+1,j-1}}{2\sqrt{2}} \quad D_{yd}(P_{i,j}) = \frac{P_{i-1,j-1} - P_{i+1,j+1}}{2\sqrt{2}} \quad (6)$$

Sa méthode utilise également l'algorithme de constance de teinte et une iteration pour améliorer la convergence de la constance de teinte. Notons que les différences sont toujours calculées à partir du même plan de couleur. Si le pixel  $P_{i,j}$  est vert dans le CFA, alors les pixels utilisés sont verts et seuls les gradients diagonaux sont calculés pour l'interpolation des pixels rouges et bleus à cette position. Le détail de l'algorithme est à consulter dans la publication originale. Un exemple de reconstruction avec cet algorithme est présenté sur la Figure 9(a).

Muresan et Parks [Muresan02] proposent une interpolation différente pour les pixels verts à la première étape, utilisant une méthode de récupération optimale basée sur l'estimation d'un métrique à partir d'un ensemble d'entraînement.

De nombreux auteurs proposent des algorithmes qui peuvent être classés dans cette catégorie. Par exemple, Mukherjee et al. ajoutent une contrainte de mémoire, utilisant 2 ou 3 lignes de l'image pour réaliser l'interpolation.

### 3.2 Reconstruction par filtrage direct dans le CFA

La méthode que nous présentons dans cette section n'est pas ou peu citée dans la littérature. Cependant, elle est particulièrement intéressante puisqu'elle est linéaire et qu'elle donne de bons résultats. De plus, c'est à la connaissance de

---

<sup>1</sup>Ici nous supposons ne pas connaître la couleur du pixel et l'appelons P

l'auteur, la première méthode qui propose une interpolation directement dans l'image CFA, considérant le voisinage de l'ensemble des pixels R, G, B sans réaliser au préalable une séparation des canaux. Cette méthode est basée sur les travaux de E. Martinez-Uriegas, qui travailla avec Ingling sur un modèle de multiplexage spatio-temporel de la luminance et de la chrominance dans la rétine humaine [Ingling83]. En fait, la méthode que nous présenterons dans la dernière section (4) a suivi le même cheminement, de la modélisation biologique à son application au traitement d'image. Curieusement, elle est également basée sur une estimation directement dans l'image CFA.

Martinez-Uriegas avait déjà proposé une méthode de compression d'image basée sur le multiplexage spatio-chromatique qui a donné lieu à un précédent brevet [Martinez95]. Il a également proposé avec ses collaborateurs une méthode de calcul de super résolution [Peters96] d'une image avec trois composantes par pixels. Le principe de cette méthode est d'arranger en voisinage les trois composantes couleurs d'une image couleur pour obtenir une image de type CFA. Ensuite, un algorithme de mosaïçage peut être utilisé pour reconstruire une image couleur à plus grande résolution. Enfin, il propose une méthode de démosaïçage que nous détaillons ici.

Dans cette méthode, les auteurs [Crane99] proposent d'utiliser des filtres de convolution qui s'appliquent directement dans l'image CFA pour interpoler chacun des plans couleur. En fait, il faut plusieurs filtres pour interpoler un plan, suivant le type de voisinage du pixel à interpoler. Ils décrivent également dans ce brevet une méthode simple pour la détermination des filtres basée sur un critère de constante de teinte qui est une simplification de l'algorithme présenté dans [Martinez95]. Dans leur brevet, une implémentation pour une matrice particulière appelée Chromaplex est détaillée. Nous donnons ici la transposition pour la matrice de Bayer. Considérons, par exemple, l'interpolation du pixel rouge à la position (3,3) de la figure 2. Appelons par des lettres minuscules les pixels devant être interpolés et par des lettres majuscules les pixels existant déjà dans l'image CFA. L'exploitation de l'hypothèse de constance de teinte est réalisée de la manière suivante :

$$r_{33} = B_{33} - \bar{B} + \bar{R} \quad (7)$$

Où  $\bar{B}$  et  $\bar{R}$  sont les moyennes de bleu et de rouge dans le voisinage. Ces moyennes peuvent être exprimées à l'aide de pixels existants ou non existants dans le voisinage. On peut écrire :

$$r_{33} = B_{33} - [B_{33} + B_{31} + B_{13} + B_{35} + B_{53}] / 5 + [R_{22} + R_{24} + R_{42} + R_{44}] / 4 \quad (8)$$

En multipliant cette équation par 20, on obtient le filtre correspondant avec des coefficients entiers.

$$\frac{1}{20} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -4 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 5 & 0 \\ -4 & 0 & 16 & 0 & -4 \\ 0 & 5 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & -4 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Il est à noter qu'il existe plusieurs possibilités pour la détermination du filtre. Dans l'exemple précédent, on aurait pu utiliser les pixels  $b_{23}$ ,  $b_{32}$ ,  $b_{43}$  et  $b_{34}$ , au lieu de  $B_{33}$ ,  $B_{31}$ ,  $B_{13}$ ,  $B_{53}$ , qui bien qu'inexistants, peuvent être déterminés par la même méthode. De cette manière, on peut étendre la taille des filtres à volonté. Pour ce travail, nous avons essayé plusieurs filtres et conservé uniquement ceux qui donnent le meilleur résultat pour l'image que nous utilisons.

Pour le cas du CFA de Bayer, nous avons plusieurs possibilités à étudier. L'exemple précédent (Equ. 9) peut être utilisé pour l'interpolation des pixels rouges aux points bleus et l'interpolation des pixels bleus aux points rouges. Le premier filtre suivant (Eq 10) sera utilisé pour interpoler les pixels rouges aux positions (2,3), (4,5), car les pixels rouges voisins sont disposés horizontalement, ou bleus aux positions (3,2) et (3,4) pour la même raison. Le deuxième filtre sera utilisé



FIG. 9 – (a) Méthode proposée par Kimmel (33.20dB) (b) Méthode proposée par Crane et al. (31.20dB)

pour l'interpolation des pixels rouges aux positions (3,2), (3,4) et bleus (2,3), (4,3). Le troisième filtre sera utilisé pour l'interpolation des pixels verts à toutes les positions ou ils sont manquants.

$$\frac{1}{80} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -4 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 5 & 0 \\ -4 & -16 & 12 & -16 & -4 \\ 0 & 30 & 64 & 30 & 0 \\ -4 & -16 & 12 & -16 & -4 \\ 0 & 5 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & -4 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{1}{80} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -4 & 0 & -4 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & -16 & 30 & -16 & 5 & 0 \\ -4 & 0 & 12 & 64 & 12 & 0 & -4 \\ 0 & 5 & -16 & 30 & -16 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & -4 & 0 & -4 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{1}{100} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 4 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & -5 & 0 & -10 & 0 & -5 & 0 \\ 4 & 0 & -8 & 25 & -8 & 0 & 4 \\ 0 & -10 & 25 & 60 & 25 & -10 & 0 \\ 4 & 0 & -8 & 25 & -8 & 0 & 4 \\ 0 & -5 & 0 & -10 & 0 & -5 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 4 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

La Figure 9 (b) montre un exemple de démosaïçage par cette méthode. Nous voyons que les résultats sont satisfaisants pour un effort de calcul réduit.

### 3.3 Démosaïçage utilisant un modèle de formation d'image

Il existe plusieurs articles utilisant un modèle de formation d'image pour la restauration d'image. Dans [Angelopoulos94], cette méthode est utilisée pour la restauration des images dégradées par un flou de mouvement (motion-blur) et un bruit Gaussien de valeur moyenne nulle. Les bases du modèle d'image couleur sont données dans cette référence. Elles incluent la gestion des trois plans couleurs dans une représentation matricielle, tenant compte de la fonction d'étalement ponctuelle (PSF) de l'optique de la caméra. L'objectif est d'appliquer une déconvolution pour retrouver les caractéristiques de la lumière incidente. La solution consiste à inverser numériquement le modèle de formation d'image par minimisation de l'erreur moyenne au carré (MMSE) entre l'image reconstruite et une référence.

Dans le cas des images CFA, l'application des modèles de formation d'image a tout d'abord été étudiée dans le cas d'une méthode Bayésienne. D. Brainard [Brainard94, Brainard95], propose le modèle d'image suivant :

$$\mathbf{y} = \mathbf{S}\mathbf{x} + \mathbf{e} \quad (11)$$

Où  $\mathbf{y}$  représente l'image échantillonnée par le capteur de la caméra avec une matrice de filtres couleurs dépliée en vecteur colonne.  $\mathbf{x}$  est un vecteur colonne formé de la représentation dépliée de l'image incidente  $i(x, y, \lambda)$ .  $\mathbf{S}$  est une matrice composée des vecteurs colonnes formés de la représentation dépliée des champs récepteurs de chacun des types de

capteur (R, G, B) dans la caméra,  $s(x, y, \lambda)$ . Cette matrice permet de représenter le sous échantillonnage dû à la matrice de filtres couleurs.  $\mathbf{e}$  représente le bruit du capteur.

Le problème consiste à estimer le vecteur  $\hat{\mathbf{x}}$  à partir du vecteur de l'image échantillonnée déplié  $\mathbf{y}$ ,  $\hat{\mathbf{x}} = f(\mathbf{y})$ . Pour cela, on calcule la distribution de probabilité a posteriori  $p(\mathbf{x}|\mathbf{y})$  qui détermine la distribution de probabilité de  $\mathbf{x}$  sachant  $\mathbf{y}$ . On utilise la règle de Bayes pour estimer cette distribution de probabilité de la manière suivante :

$$p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = p(\mathbf{y}|\mathbf{x})p(\mathbf{y}) \quad (12)$$

Où  $p(\mathbf{x})$  est la distribution a priori qui représente la vraisemblance de rencontrer chaque image possible. Cette distribution relate ce qui est connu de l'image avant de savoir ce que le capteur a mesuré. Brainard justifie que l'a priori est souvent utilisé dans les méthodes de reconstruction. Par exemple un filtre passe-bas comme l'interpolation bilinéaire est basé sur l'a priori que l'image ne contient pas de fréquences au delà de la limite de Nyquist du capteur. La seconde distribution de probabilité est la vraisemblance des données du capteur sachant l'image captée. Cette vraisemblance est une spécification du modèle de l'image. Dans ce cas, cette distribution est donnée directement par l'équation 11 et s'écrit :

$$p(\mathbf{y}|\mathbf{x}) = N(\mathbf{S}\mathbf{x}, \mathbf{K}_e) \quad (13)$$

Où  $N(\mathbf{S}\mathbf{x}, \mathbf{K}_e)$  est la distribution normale de moyenne  $\mathbf{S}\mathbf{x}$  et de variance  $\mathbf{K}_e$ , variance du bruit du capteur. Pour estimer la distribution a priori, Brainard utilise un modèle linéaire d'image incidente,  $\mathbf{x} = \mathbf{B}\mathbf{w}$ , où chaque image peut se décomposer comme une somme pondéré  $\mathbf{w}$  d'images de bases  $\mathbf{B}$ . Il suppose également que  $\mathbf{w}$  suit une loi Normale multi variable de moyenne  $\mathbf{u}_w$  et de covariance  $\mathbf{K}_w$ . Dans ce cas, la distribution a priori,  $p(\mathbf{x})$ , s'exprime par :

$$p(\mathbf{x}) = N(\mathbf{B}\mathbf{u}_w, \mathbf{B}\mathbf{K}_w\mathbf{B}^T) \quad (14)$$

Dans sa proposition, Brainard prend comme modèle de formation de l'image, la transformation d'une image couleur en trois composantes par pixel en une image avec une seule composante par pixel et le bruit du capteur. Taubman [Taubman00] propose d'inclure aussi le filtrage passe-bas de la fonction d'étalement ponctuelle de l'optique de la caméra. Le modèle d'image est basé sur un super pixel, ou cellule de base, qui, dans le cas de la matrice de Bayer, est composé d'un voisinage 2x2. Par cette méthode, il évite d'explicitement l'influence de la matrice dans la formation de l'image. Le modèle est le suivant :

$$\mathbf{y}[\mathbf{n}] = \mathbf{T}[\mathbf{n}] * \mathbf{x}[\mathbf{n}] + \delta[\mathbf{n}] \quad \hat{\mathbf{y}}(\mathbf{w}) = \hat{\mathbf{T}}(\mathbf{w})\hat{\mathbf{x}}(\mathbf{w}) + \hat{\delta}(\mathbf{w}) \quad (15)$$

La forme du modèle dans l'espace et dans le domaine de Fourier est donnée. Où  $\mathbf{T}[\mathbf{n}]$  est la réponse impulsionnelle du modèle de caméra incluant l'optique et le mosaïçage, et  $\hat{\mathbf{T}}(\mathbf{w})$  sa transformée de Fourier.  $\mathbf{y}[\mathbf{n}]$  est l'image représentée en vecteur colonne mesurée par le capteur,  $\mathbf{x}[\mathbf{n}]$  l'image incidente et  $\delta[\mathbf{n}]$  le bruit du capteur. La solution optimale est donnée dans le domaine de Fourier par :

$$\hat{\mathbf{x}}^{LLMSE}(\mathbf{w}) = \hat{\mathbf{F}}(\mathbf{w})\hat{\mathbf{y}}(\mathbf{w}) \quad \text{avec} \quad \hat{\mathbf{F}}(\mathbf{w}) = \mathbf{\Gamma}_{\mathbf{x}\mathbf{y}}(\mathbf{w})\mathbf{\Gamma}_{\mathbf{y}}^{-1}(\mathbf{w}) \quad (16)$$

Où  $\mathbf{\Gamma}_{\mathbf{x}\mathbf{y}}(\mathbf{w})$  et  $\mathbf{\Gamma}_{\mathbf{y}}(\mathbf{w})$  sont des densités spectrales de puissance estimées à partir de la transformée de Fourier des matrices d'intercorrélations entre l'image incidente et l'image mesurée. Cette solution est la solution optimale au sens de Wiener. Cependant, elle nécessite l'inversion et la manipulation de matrices de grande dimension. Le modèle matriciel utilisé impose de déplier les images couleurs de dimension  $HW \times 3$  en vecteur de taille  $3HW \times 1$ . La minimisation est donc effectuée par une inversion d'une matrice  $3HW \times 3HW$ , qui n'est pas réalisable simplement. Dans son article, Taubman propose

d'utiliser un critère d'invariance d'échelle qui permet de calculer l'estimateur LLMSE de manière à avoir une transformée de Fourier continue et simplifier le calcul de la solution. Il propose également d'utiliser un filtrage  $\mathbf{F}$  de support fini pour la reconstruction. Il en découle une méthode pratique d'implémentation de la solution.

Trussell [Trussell01, Trussell02] propose également un autre modèle d'image qui donne explicitement le sous-échantillonnage par la matrice de filtre couleur. Son modèle s'écrit :

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \left[ \mathbf{H}\mathbf{S}^T \mathbf{x} + \eta \right] \quad (17)$$

Où  $\mathbf{C}$  représente le produit de Kronecker des matrices de sous-échantillonnage unidimensionnelles composées de 0 et de 1 dans la diagonale.  $\mathbf{H}$  représente le filtrage optique,  $\mathbf{S}^T$  la transformation de l'image incidente, définie pour chaque longueur d'onde discrète en un ensemble réduit de composante correspondant à l'échantillonnage en longueur d'onde par les sensibilités spectrales des filtres et  $\eta$  le bruit d'échantillonnage. La solution revient à trouver une matrice de convolution  $\mathbf{D}$  telle que l'erreur moyenne au carré  $\Phi(\mathbf{D}) = E \{ \|\mathbf{x} - \mathbf{D}\mathbf{y}\|^2 \}$  soit minimum. La solution est donnée par :

$$\mathbf{D} = \mathbf{K}_{xx\lambda} \mathbf{S}\mathbf{H}^T \mathbf{C}^T \left[ \mathbf{C}\mathbf{H}\mathbf{S}^T \mathbf{K}_{xx\lambda} \mathbf{S}\mathbf{H}^T \mathbf{C}^T + \mathbf{C}\mathbf{K}_{nn} \mathbf{C}^T \right]^{-1} \quad (18)$$

Où  $\mathbf{K}_{xx\lambda}$  est la matrice d'autocorrélation pour les dépendances spatiales et de longueur d'onde de l'image originale. Cette solution paraît simple, mais comme précédemment, elle nécessite l'inversion de matrices très grandes. Dans son travail, Trussell arrive à réduire le problème en utilisant la transformée de Fourier. La solution nécessite une transformée de Fourier de chaque plan couleur et 16x16 inversions de matrices dans le cas de la matrice de Bayer.

Ces méthodes basées sur un modèle statistique et de minimisation de l'erreur ne sont pas faciles à implémenter, spécialement à cause de la dimensionnalité du problème. Pour cette raison, nous ne proposons pas de comparaison pour ces méthodes. De même, il n'y a pas, dans les publications correspondantes, de simulations effectuées et présentées.

### 3.4 Méthodes non linéaire de dé-aliasing

Comme nous l'avons déjà discuté dans la section 2.3, les artefacts lors du démosaïçage sont une conséquence de l'aliasing. Topfer et al. [Topfer98] décrivent les motifs d'aliasing dans les plans rouge, vert et bleu sous échantillonnés selon la matrice de Bayer, en utilisant la transformée de Fourier. Ils montrent qu'il existe deux types d'artefacts, un lissage à cause de l'interpolation des pixels manquants utilisant les pixels voisins et l'apparition de fausses couleurs, conséquentes à la violation du théorème d'échantillonnage et au décalage des pixels des plans couleur. Ainsi, l'aliasing fait apparaître, à la reconstruction, des basses fréquences qui n'existaient pas auparavant et le décalage des pixels entre rouge, vert et bleu fait apparaître des lignes et des textures de couleur. Ils proposent ensuite une relecture des grandes classes d'algorithmes au regard des motifs d'aliasing et des méthodes d'interpolation.

Topfer et al. justifient que les méthodes linéaires sont limitées puisqu'elles ne peuvent pas réaliser de dé-aliasing et discutent de l'avantage des méthodes non linéaires telles que celles basées sur la constance de teinte et la reconnaissance de formes. Mais, hormis les travaux de Adams, les méthodes de reconnaissance de formes sont construites intuitivement et ne sont pas basées sur une description explicite de l'aliasing. Goltzbach et al. [Goltzbach01] proposent une méthode de dé-aliasing directement issue des motifs d'aliasing pour laquelle les hautes fréquences du plan vert sont artificiellement ajoutées au signaux rouge et bleu. En fait, on retrouve cette idée bien auparavant dans le brevet de Dillon et Bayer [Dillon79-2] pour lequel un filtrage passe-bas du vert est utilisé pour calculer les hautes fréquences du vert qui sont ensuite ajoutées aux

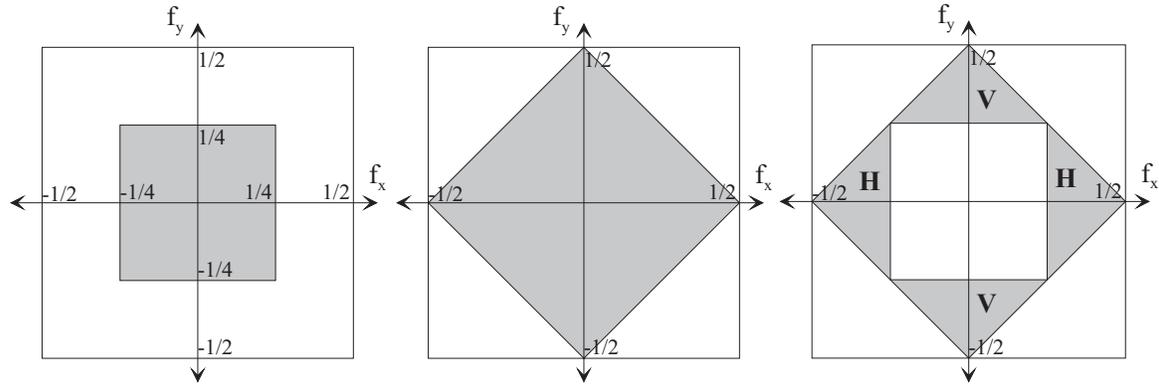


FIG. 10 – Motifs d’aliasing dans le cas de la matrice de Bayer. Le grand carré représente la limite de Niquist pour la fréquence d’échantillonnage du capteur, toutes couleurs confondues (a) Motif d’aliasing pour les plans rouge et bleu. (b) Motif d’aliasing pour le plan vert. (c) Filtre passe-haut idéal pour l’extraction des hautes fréquences horizontales (H) et verticales (V) du plan vert

signaux rouge et bleu. La Figure 10(a)(b) illustre les motifs d’aliasing pour les plans rouges, verts et bleus. La Figure 10(c) montre les filtres idéaux pour la récupération des hautes fréquences du vert dans les directions horizontales et verticales.

Dans leur article, Goltzbach et al. ne donnent pas de détails sur les filtres utilisés. Nous avons donc choisi nos propres filtres pour l’estimation des hautes fréquences du vert à ajouter au rouge et bleu. Un exemple de reconstruction est donné à la Figure 9. Le résultat n’est pas très satisfaisant pour une méthode qui est supposée permettre de réduire l’aliasing. Mais cela tient certainement à notre choix de filtre, en notant cependant que ces filtres sont difficiles à réaliser.

### 3.5 Autres méthodes

Il existe de nombreuses autres méthodes dont nous ne donnerons pas le détail dans cet article, mais qui méritent d’être citées tout de même.

Gupta et Chen [Gupta01] utilisent un algorithme de filtrage médian vectoriel pour le démosaïçage. Pour cela, ils définissent un pseudo pixel composé des trois valeurs voisines contenant une valeur de pixel rouge, vert et bleu. Ils définissent ensuite un vecteur de huit pseudo pixels pour interpoler les pixels rouges et bleus lorsque le vert est présent et seize pseudo pixels pour le cas où le rouge et le bleu sont présent. Les valeurs interpolées correspondent à un vecteur à trois composantes rouge, vert et bleu correspondant au minimum de la distance Euclidienne avec les vecteurs de pseudo pixels. Cette méthode semble donner de bons résultats, mais la méthode de détermination du vecteur minimisant la distance avec le vecteur de pseudo pixels n’est pas décrite précisément et risque d’être coûteuse en temps de calcul.

Une méthode basée sur des gradients sophistiqués dans plusieurs directions a été proposée par Chang et al. [Chang99]. Cette méthode semble donner des résultats meilleurs que celle de Hamilton et Adams [Hamilton97] d’après les auteurs. Lu et Tan [Lu01] donnent une extension de cette méthode en utilisant plusieurs couches sélectionnées à partir d’une segmentation de l’histogramme des plans couleurs. Kuno et al. [Kuno99] proposent une méthode de classification de formes basée sur un seuil de gradient et utilisant les basses fréquences horizontales et verticales pour l’interpolation du vert. Weerasinghe et al. [Weerasinghe02] séparent le canal vert en deux canaux, un, formé des pixels verts sur les lignes contenant des pixels rouges, et l’autre, formé des pixels verts sur les lignes contenant des pixels bleus. Les pixels verts existants dans le CFA

original sont remplacés par la médiane des pixels verts voisins. Ensuite, une interpolation utilisant le gradient est réalisée.

Keren et Osadchy [Keren99] utilisent une approche de régularisation conjointement à une technique pour forcer la corrélation entre les canaux de couleur. Leur article fait également une revue de l'utilisation des méthodes de régularisation pour le traitement d'images couleurs. Lee et al. [Lee01] utilisent l'interpolation basée sur des B-splines. Go et al. [Go00] utilisent un réseau de neurone de type perceptron à trois couches. Tao et al. [Tao99] utilisent la transformée en ondelettes pour l'interpolation. Finalement, Ramanath et al. [Ramanath03] utilisent des filtres bilatéraux.

### 3.6 Méthodes de restauration d'image

Il existe également de nombreuses méthodes qui ne sont pas à proprement dites des méthodes de démosaïçage, puisqu'elles nécessitent une initialisation consistant à interpoler préalablement les pixels manquants par une méthode de démosaïçage. Ces algorithmes réalisent alors une correction sur les pixels précédemment interpolés pour améliorer significativement la qualité de l'image. Par exemple, Kimmel [Kimmel99] propose une procédure de rehaussement basée sur une diffusion de flux anisotrope utilisant la dérivée directionnelle inverse et l'équation de la chaleur comme diffusion le long des contours.

Plusieurs méthodes de correction sont proposées dans la littérature. Il en est une qui donne de très bons résultats [Gunturk02]. Elle est basée sur la copie des hautes fréquences spatiales du vert sur les canaux rouges et bleus comme proposé précédemment par Goltzbach et al. [Goltzbach01] et Dillon et Bayer [Dillon79-2] et une projection sur des espaces contraints (Projection on constraint set - POCS). Les auteurs justifient par des simulations que la corrélation des hautes fréquences spatiales entre les différents canaux couleurs est très grande et qu'on peut donc utiliser les hautes fréquences du vert pour augmenter artificiellement la résolution du rouge et du bleu. Cette méthode utilise une décomposition en ondelettes pour séparer les hautes fréquences des basses fréquences dans les plans couleurs. Soit  $S(n_1, n_2)$  un plan couleur la décomposition à l'analyse est définie par :

$$(W_{ij}S)(n_1, n_2) = h_i(n_1) * [h_j(n_2) * S(n_1, n_2)] \quad (19)$$

Avec  $i \in [0, 1], j \in [0, 1]$  et  $h_0 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} / 4$  et  $h_1 = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} / 4$ .  $(W_{00}S)$  est la sous bande basses fréquences et  $(W_{10}S), (W_{01}S), (W_{11}S)$  sont les sous bandes de détails horizontaux, verticaux et diagonaux. A la synthèse, la décomposition est définie comme suit :

$$(U_{ij}X)(n_1, n_2) = g_i(n_1) * [g_j(n_2) * X(n_1, n_2)] \quad (20)$$

Où  $g_0 = \begin{bmatrix} -1 & 2 & 6 & 2 & -1 \end{bmatrix} / 8$  et  $g_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & -6 & 2 & 1 \end{bmatrix} / 8$ .

Les auteurs définissent deux espaces contraints, d'une part l'espace des pixels existants dans le CFA, ou observation  $\Lambda_S$  et un projecteur  $C_o$ , qui force les valeurs interpolées à respecter les pixels existants à l'origine dans le CFA et, d'autre part, l'espace du détail et son projecteur  $C_d$  qui force les hautes fréquences spatiales du rouge et du bleu à ressembler à celles du vert.

$$\begin{aligned} C_o &= \{S(n_1, n_2) : S(n_1, n_2) = O(n_1, n_2) \quad \forall (n_1, n_2) \in \Lambda_S, \quad S = R, G, B\} \\ C_d &= \left\{ \begin{array}{l} S(n_1, n_2) : |(W_k S)(n_1, n_2) - (W_k G)(n_1, n_2)| \leq T(n_1, n_2) \\ \forall (n_1, n_2) \in \Lambda_S, \quad \text{for all } k = 2, 3, 4 \text{ and } S = R, B \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

L'algorithme est itératif appliquant successivement les projections sur les deux espaces contraints. Il débute par une initialisation des pixels manquants, bilinéaire ou utilisant un algorithme plus complexe tel que celui de Hamilton et Adams [Hamilton97] pour les pixels verts. Ensuite on construit une version sous-échantillonnée des pixels bleus en utilisant les pixels



FIG. 11 – (a) Méthode proposée par Goltzbach et al. (29.63dB) Méthode de projection alternée proposée par Gunturk et al. avec une initialisation bilinéaire (33.52dB).

existants. On construit une version des pixels verts pré-interpolés aux positions des pixels bleus. On décompose ensuite ces matrices sous-échantillonnées suivant l'équation 19. On copie les sous bandes du canal bleu sur les sous bandes du canal vert. Cela revient à considérer  $T(n_1, n_2) = 0$  dans (21). On reconstruit les pixels verts sous-échantillonnés par synthèse en utilisant l'équation 20 et  $G = U_1G + \sum_i U_iB$  que l'on copie dans la matrice du canal vert aux bonnes positions. On répète ensuite cette procédure pour les pixels verts aux points rouges.

Ensuite, on applique la projection de détail en effectuant cette opération pour les canaux rouge et bleu à l'aide de l'ensemble des pixels verts estimés précédemment, puis on projette sur les observations en remplaçant les pixels rouges et bleus existants. On recommence ensuite ces opérations jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint.

Dans leur article, les auteurs discutent plusieurs versions de cet algorithme, suivant le choix de  $T(n_1, n_2)$ , le niveau de décomposition en ondelette et le nombre d'itérations de l'algorithme. Dans notre implémentation, nous utilisons  $T(n_1, n_2) = 0$ , un seul niveau de décomposition en ondelette et huit itérations. Par contre, nous comparons l'influence de l'initialisation entre l'option bilinéaire ou par classification de formes suivant le gradient corrigé par le Laplacien. Les figures 11(b), 12(a) présentent les résultats pour les deux initialisations.

## 4 Démosaïçage par sélection de fréquences

Les détails du modèle et de l'algorithme peuvent être trouvés dans [Herault96, Alleysson01, Alleysson02, Alleysson03, Alleysson04]. Nous ne donnons ici que quelques résultats pour illustrer la discussion. On peut définir de manière équivalente une image couleur comme un vecteur à trois dimensions pour chaque pixel où un scalaire de luminance plus un vecteur à trois composantes contenant la chrominance codée en opposition de couleur. Contrairement à une image couleur, une image acquise à travers un CFA est déjà une image scalaire contenant une seule composante couleur par pixel. Cela peut s'exprimer comme la projection de l'image couleur sur le vecteur unitaire  $[1 \ 1 \ 1]$  dans l'espace couleur qui peut s'écrire en



FIG. 12 – (a) Méthode de Gunturk avec une initialisation du canal vert avec la méthode de Hamilton et Adams. (36.94dB)  
 (b) Méthode par sélection de fréquence. (34.39dB)

terme de luminance et chrominance comme suit :

$$I_{CFA} = \underbrace{\sum_i p_i C_i(x, y)}_{\Phi(x, y)} + \underbrace{\sum_i C_i(x, y) \tilde{m}_i(x, y)}_{\Psi_{CFA}(x, y)} \quad (22)$$

Avec  $i \in \{R, G, B\}$ ,  $p_i$  est la proportion de chaque couleur  $i$  dans le capteur. Les fonctions  $\tilde{m}_i$  sont des fonctions de modulations qui définissent le sous échantillonnage des pixels dans chacun des plans  $i$ . Ces fonctions sont périodiques dans tout capteur ayant un arrangement régulier des filtres de couleur. Chaque composante couleur  $C_i$  correspond à l'échantillonnage des variables spatiales  $(x, y)$  et de longueur d'onde  $\lambda$  de l'irradiance incident  $E(x, y, \lambda)$  à travers une fonction de sensibilité spectrale  $\varphi_i(\lambda)$  donnée par la caractéristique des filtres de couleur et du capteur,  $C_i(x, y) = \int_{\lambda} E(x, y, \lambda) \varphi_i(\lambda) d\lambda$ .

Enfin,  $\Phi(x, y)$  représente la luminance de l'image couleur originale avant le mosaïçage et  $\Psi_{CFA}$  représente la chrominance dans le CFA. Nous voyons que ce modèle prédit que la partie luminance dans le cas d'une image CFA est équivalente à la luminance définie dans le cas d'une image couleur. Seule la chrominance est sous échantillonnée par les fonctions de modulations. Intuitivement, cela peut s'interpréter de la manière suivante. Chaque couleur R, G ou B contient une partie de l'information d'intensité lumineuse, la luminance, et une partie de l'information chromatique correspondant à sa sensibilité chromatique. La luminance est donc définie avec le maximum de résolution spatiale puisqu'elle est portée par chaque pixel. Une conséquence directe de ce modèle est que la luminance n'est pas sujette à l'interpolation et peut être estimée directement dans l'image CFA. Nous voyons ici l'importance d'utiliser la matrice de filtre couleur dans son ensemble comme préalablement proposé par Crane et al. [Crane99].

A partir du modèle d'image CFA, nous pouvons calculer la transformée de Fourier pour connaître la représentation en fréquences des composantes luminance et chrominance. Lorsque les fonctions de modulation sont périodiques (cas de Bayer), elles peuvent s'exprimer avec des fonctions cosinus, leurs transformées de Fourier s'expriment avec des distributions de Dirac. Les distributions de Dirac ont la propriété de translation en fréquence des spectres des signaux R, G et B. Finalement, le spectre d'une image CFA suivant la matrice de Bayer est composée d'un arrangement des fréquences spatiales comme

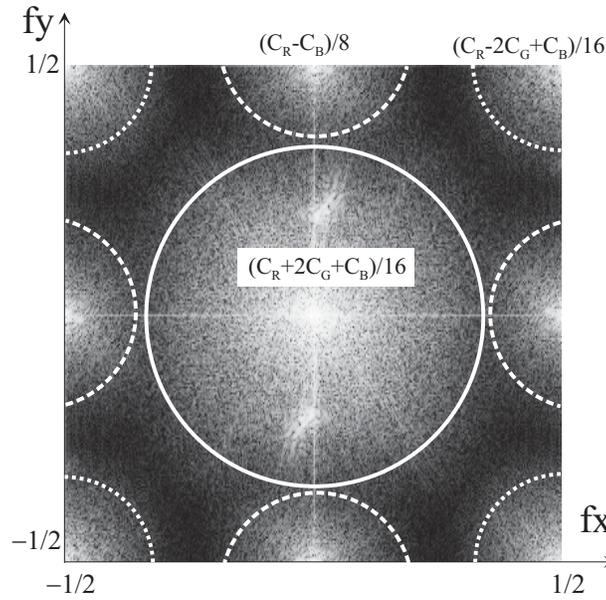


FIG. 13 – Représentation de l'énergie dans le spectre de la transformée de Fourier d'une image CFA. On distingue neuf régions où l'énergie est concentrée. Au centre, l'énergie du signal de luminance est concentrée et sur les bords et dans les coins l'énergie du signal de chrominance

illustré sur la Figure 13. Sur cette figure, nous voyons que l'énergie dans le spectre de Fourier d'une image CFA est répartie en neuf régions. Une au centre et huit sur les bords et dans les coins du spectre. En regardant précisément les valeurs de ces neuf signaux, nous voyons que celui au centre est composé de la luminance et les autres d'oppositions chromatiques.

La forme du spectre de Fourier (Figure 13) d'une image CFA montre que le démosaïçage peut être réalisé en estimant la luminance et la chrominance dans le spectre de Fourier par sélection des fréquences correspondantes. Cette sélection peut se réaliser par filtrage linéaire uniforme en utilisant par exemple le filtre défini par l'équation 23 pour l'estimation de la luminance. Ensuite les chrominances peuvent-être interpolées par filtrage bilinéaire en utilisant les filtres de l'équation 2.

La Figure 13 montre également que la notion d'aliasing dans une image CFA n'est pas exactement la même que lorsqu'on considère chacun des plans couleurs du CFA pris séparément et dans lequel on a ajouté des zéros, comme le font Topfer et al. [Topfer98]. En effet, si l'on considère l'image CFA en entier, nous voyons que le phénomène d'aliasing intervient entre la luminance et la chrominance. Les signaux de luminance et de chrominance doivent partager le spectre de Fourier pour leur propre représentation. Lorsque ces signaux se recouvrent, il y a aliasing. Cet aliasing empêche de séparer de manière parfaite l'information de luminance de celle de chrominance et les algorithmes de démosaïçage sont un compromis entre la qualité de l'estimation de luminance et celle de chrominance.

Lors de l'application d'un algorithme de démosaïçage dans un cas où il y a de l'aliasing, il est possible que certaines informations de luminance soient extraites dans le signal de chrominance et vice et versa. Il y a donc quatre artefacts possibles dans les algorithmes de démosaïçage, deux de plus que prévu par Topfer et al. [Topfer98]. Si l'on sous estime l'information de luminance, elle est trop passe-bas, c'est l'effet de lissage. Au contraire, si l'on surestime la luminance, il est possible que des informations de chrominance perturbent ce signal, il apparaît dans ce cas un effet de grille. La même chose s'applique sur la chrominance. Si l'on sous estime la chrominance, il apparaît un effet de couleur d'eau pour lequel la couleur des objets passe outre leurs frontières. Si l'on surestime la chrominance, un effet de fausses couleurs apparaît engendré par



FIG. 14 – Illustration des artefacts lors de l’utilisation des algorithmes de démosaïçage. (a) Lissage excessif (b) Effet de grille (c) Couleur d’eau (d) Fausses couleurs

le bruit des hautes fréquences de luminance sur la chrominance. La figure 14 montre une illustration de ces artefacts. La plupart des algorithmes historiques présente les artefacts de lissage excessif et de fausses couleurs (ex bilinéaire), montrant une sous estimation de la luminance, et la présence de hautes fréquences de luminance dans le signal de chrominance. Les algorithmes récents montrent plutôt des effets de grille et de couleur d’eau ([Longere02]).

La Figure 13 montre également que le maillage de Bayer constitue l’arrangement spatial optimal de trois couleurs sur une grille carrée en terme de réduction d’aliasing. En effet, l’énergie de la chrominance dans le spectre est située dans les coins et les bords du spectre, le plus éloigné possible du centre du spectre où est représentée la luminance, maximisant la possibilité de représenter la chrominance et la luminance dans le spectre sans aliasing. Ceci est dû au fait que la fréquence d’échantillonnage minimale de chaque couleur dans la matrice de Bayer est supérieure à un demi dans la direction horizontale, verticale et diagonale. Tout autre arrangement ayant une fréquence d’échantillonnage minimale supérieur à cette valeur pour une des couleurs dans une des directions sera sous optimal. Il n’y a pas, à la connaissance de l’auteur, d’autres matrices à géométrie carrée ayant cette propriété.

Nous avons montré par ailleurs que la population double de pixels verts n’améliore pas la qualité de reconstruction de la luminance [Alleysson04], contrairement à ce que pensait Bayer et qui a été entretenu depuis lui sans vérifications. En effet, le spectre de l’image CFA contient la transformée de Fourier du signal  $C_R - C_B$  au milieu de chaque bord du spectre. Or cette région est celle où la possibilité d’aliasing avec les hautes fréquences horizontales et verticales de la luminance est la plus grande. Les énergies de la chrominance située dans les coins (spectre de  $C_R - 2C_G + C_B$ ) sont moins sujettes à l’aliasing, puisque la diagonale est plus grande que les cotés dans un carré et que les hautes fréquences diagonales de la luminances sont moins nombreuses que les horizontales et verticales. Il est donc important de réduire la largeur de bande du signal  $C_R - C_B$ . Une manière de faire cela est de modifier la proportion des couleurs dans la matrice. En effet, si l’on échange par exemple le rôle du vert et du bleu dans la matrice, c’est-à-dire en fabriquant une matrice ayant deux fois plus de pixels bleus que de verts et de rouges, on aura  $C_R - C_G$  dans les bords du spectre. Or, les signaux rouge et vert sont plus corrélés que les signaux rouge et bleu, car les fonctions de sensibilité spectrales des filtres rouge et vert sont très proches. Donc, comme nous l’avons montré [Alleysson04, Web], la reconstruction est meilleure si l’on utilise une matrice arrangée spatialement comme celle de Bayer, mais avec deux fois plus de bleus que de rouge et de vert.

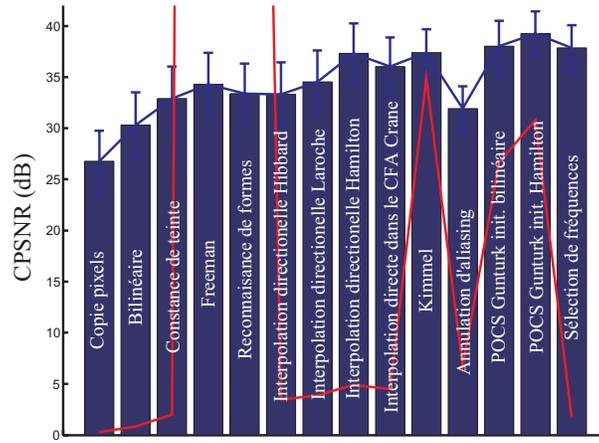


FIG. 15 – Comparaison des performances des algorithmes.

$$\begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 2 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 1 & -5 & 3 & -9 & 3 & -5 & 1 & -1 & 0 \\
 1 & 0 & 2 & 3 & 1 & 7 & 1 & 3 & 2 & 0 & 1 \\
 0 & -2 & 1 & -9 & 7 & 104 & 7 & -9 & 1 & -2 & 0 \\
 1 & 0 & 2 & 3 & 1 & 7 & 1 & 3 & 2 & 0 & 1 \\
 0 & -1 & 1 & -5 & 3 & -9 & 3 & -5 & 1 & -1 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 2 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix} /128 \quad (23)$$

Un résultat de l'interpolation par cette méthode est donné sur la Figure 12.

## 5 Resultats

Dans cette section nous présentons les résultats pour une base de données de 23 images de la base Kodak<sup>2</sup>. En testant les algorithmes sur plusieurs images, l'effet d'une image particulière est amoindri et la comparaison est plus robuste. Les 23 images de la base Kodak sont extraites en résolution 512x768. La Figure 15 montre la moyenne du pic du rapport signal à bruit pour chacune des méthodes, ainsi que la variance. La courbe superposée en rouge montre le temps de calcul en seconde pour une implémentation sous Matlab sur une machine Pentium 4 cadencé à 2.66Ghz avec 256 Mo de RAM. La table 5 donne le détail des PSNR moyens toutes couleurs confondues ou par plans de couleur séparé pour chacune des méthodes.

La méthode qui donne la meilleure reconstruction est l'algorithme de Gunturk avec une initialisation par la méthode de Hamilton. Ces résultats par mesure objective (PSNR) montre clairement qu'il existe un compromis entre qualité de la reconstruction et vitesse d'exécution. Dans ce compromis notre algorithme se positionne favorablement puisqu'il rivalise avec celui de Gunturk en terme de qualité de reconstruction pour un effort de calcul inférieur à la méthode de constance des teintes.

D'un point de vue subjectif, en regardant les images reconstruites, nous voyons que les algorithmes performants en terme de PSNR réduisent les fausses couleurs et l'effet de flou, mais ont tendance à augmenter l'effet de grille et de couleur d'eau, comme prédit par le modèle fréquentiel d'image CFA.

<sup>2</sup><http://www.cipr.rpi.edu>

	CPSNR	PSNR R	PSNR G	PSNR B	Temps (s)
Copie pixels	26.7674	25.9515	28.9205	26.0840	0.0577
Bilinéaire	30.3007	29.4467	33.3600	29.2175	0.1684
Constance de teinte	32.9182	32.6879	33.3239	32.8085	0.3980
Freeman	34.3036	34.3865	34.0551	34.5422	110.1148
Recon. de formes	33.3848	32.6945	34.5966	33.3938	36.1419
Interp. Dir. Hibbard	33.3108	33.1026	33.5626	33.3088	0.6925
Interp. Dir. Laroche	34.5411	34.2005	34.9724	34.5288	0.7750
Interp. Dir. Hamilton	37.3251	36.4413	38.5109	37.3888	0.9850
Interp. direct Crane	36.0393	34.7322	39.7272	35.2598	0.8969
Kimmel	37.3845	36.3137	39.5065	37.1801	6.9755
Annulation d'aliasing	31.9281	30.7688	34.4653	31.5505	1.3430
POCS Gunturk Bilin.	38.0124	36.7764	40.3564	37.8453	5.3275
POCS Gunturk Hamilton	39.2507	37.7989	41.6744	39.3554	6.1623
Sélection fréquence	37.8749	36.3072	40.9123	37.7797	0.3574

TAB. 1 – Résultat de simulation des différents algorithmes

## 6 Conclusion

Nous voyons dans cet article que depuis trente ans, l'interpolation des couleurs dans les caméras numériques à un seul capteur, construite avec une matrice de filtres couleurs, a mis en oeuvre la plupart des techniques de traitement du signal et des images. Les résultats de l'interpolation sont très variables d'une méthode à l'autre, ainsi que le temps de calcul ou la difficulté de l'implémentation. Il n'existe pas de méthode optimale qui réglerait le problème une fois pour toute et le choix d'une méthode doit-etre guidé par les contraintes de qualité de reconstruction ou de temps de calcul.

La méthode que nous avons développée est linéaire et uniforme. Elle exploite la corrélation entre les signaux de couleur puisque la luminance est estimée avec une grande largeur de bande, donc utilisant comme a priori que la largeur de bande de la chrominance est plus faible à cause de la corrélation entre les signaux couleurs. Notre méthode résulte donc en le meilleur compromis qualité de reconstruction et vitesse de calcul, permettant son utilisation pour les systèmes vidéos.

Finalement, une nouvelle méthode d'acquisition a récemment fait son apparition. Cette méthode utilise la différence de profondeur d'absorption des lumières suivant la longueur d'onde dans un substrat de silicium (Foveon X3). Ce procédé permet donc l'acquisition de trois sensibilités spectrales par positions spatiale et un algorithme de démosaïchage n'est pas nécessaire. Ce procédé est encore aujourd'hui cher comparé aux produits basés sur des caméras mono-capteur. Aussi, on peut se demander s'il est utile de disposer de trois composantes couleurs par pixels à l'acquisition puisque le système visuel humain, lui, n'échantillonne qu'une couleur par position spatiale. On peut donc supposer que les caméras numériques couleurs basées sur une matrice de filtres couleurs ont encore beaucoup d'avenir.

## 7 Remerciement

Je tiens à remercier Jeanny Hérault et Sabine Süssstrunk pour leur collaboration dans ce travail. Je remercie aussi les étudiants qui ont participé à l'implémentation des algorithmes, Daniel Banny, Joanna Marguier, Brice de Lavarène. Enfin, je remercie Carine Royer et les relecteurs anonymes pour la correction du manuscrit.

## Références

- [Acharya00] T. ACHARYA, "Efficient algorithm for color recovery from 8-bit to 24-bit color pixels", *US patent 6,091,851*, to Intel Corporation, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 2000.
- [Adams95] J.E. ADAMS Jr, "Interactions Between Color Plane Interpolation and Other Image Processing Functions in Electronic Photography," *Proc. SPIE, Cameras and Systems for Electronic Photography and Scientific Imaging*, ed. C.N. Anagnostopoulos/M.P. Lesser, vol. 2416, 1995, pp. 144-151.
- [Adams96] J.E. ADAMS Jr, J.F. HAMILTON, "Adaptive color plan interpolation in single sensor color electronic camera", *US patent 5,506,619*, to Eastman Kodak Company, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1996.
- [Adam97-1] J.E. ADAMS Jr., "Design of practical color filter array interpolation algorithms for digital cameras", *Proc. SPIE Real Time Imaging II*, Vol. 3028, 1997, pp. 117-125.
- [Adams97-2] J.E. ADAMS Jr. and J.F. HAMILTON, Jr., "Adaptive color plane interpolation in single sensor color electronic camera," *US patent 5,652,621*, to Eastman Kodak Company, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1997.
- [Adams98-1] J.E. ADAMS Jr., "Design of practical color filter array interpolation algorithms for digital cameras II", *Proc. Int'l Conf. Image Processing, (ICIP'98)*, Chicago, IL, USA, vol. 1, Oct. 1998, pp. 488-492.
- [Adams98-2] J.E. ADAMS Jr., K. PARULSKI, and K. SPAULDING, "Color processing in digital cameras", *Proc. Of the IEEE*, Vol. 18, no. 6, 1998, pp 20-30.
- [Adcock77] W.A. ADCOCK and F.I. SKAGGS, "Single sensor time encoded color image system", *US Patent 4,065,785*, to Texas Instruments Incorporated, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1954.
- [Angelopoulos94] G. ANGELOPOULOS and I. PITAS, "Multichannel Wiener filters in color image restoration", *IEEE Trans. Circuit and System for video technology*, Vol 4, No 1, 1994, pp. 83-87.
- [Alleysson01] D. ALLEYSSON and J. HÉRAULT, "Interpolation d'images couleurs sous échantillonnées par un modèle de perception", *Proc. GRETSI'2001*, Toulouse, Sept. 2001.
- [Alleysson02] D. ALLEYSSON, S. SÜSSTRUNK, and J. HÉRAULT, "Color Demosaicing by estimating luminance and opponent chromatic signals in the Fourier domain.", *Proc. IS&T/SID 10th Color Imaging Conf.*, CIC10, Scottsdale, Arizona, pp. 331-336 , 2002.
- [Alleysson03] D. ALLEYSSON, S. SÜSSTRUNK, and J. MARGUIER, "Influence of spectral sensitivity functions on color demosaicing." *Proc. IS&T/SID 11th Color Imaging Conf.*, CIC11, Scottsdale, Arizona, pp. 351-357 , 2003.
- [Alleysson04] D. ALLEYSSON, S. SÜSSTRUNK, and J. HÉRAULT, "Linear Demosaicing inspired by the Human Visual System", *IEEE Trans. on Image Processing*, to appear in March 2005.
- [Banning54] T.A BANNING JR, "Color television and the like", *US Patent 2,683,769*, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1954.
- [Banning56] T.A BANNING JR, "Color television and the like", *US Patent 2,755,334*, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1956.
- [Bayer76] B.E. BAYER, "Color imaging array", *US Patent 3,971,065*, to Eastman Kodak Company, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1976.
- [Brainard94] D.H. BRAINARD, "Bayesian method for reconstructing color images from trichromatic samples", *Proc. IS&T 47th Annual Conference ICPS*, Rochester, NY, 1994, pp. 375-380.

- [Brainard95] D.H. BRAINARD, and D. Sherman, "Reconstructing Images from Trichromatic Samples, from Basic Research to Practical Applications", *Proc. IS&T/SID 3rd Color Imaging Conference, (CIC'95)*, Scottsdale, Arizona, 1995, pp. 4-10.
- [Buchsbaum83] G. BUCHSBAUM and A. GOTTSCHALK, "Trichromacy, opponent colours coding and the optimum colour information transmission in the retina", *Proc. R.. Soc. Lond.*, B220, 1983, pp. 89-113.
- [Chang99] E. CHANG, S. CHEUNG, and D. PAN, "Color filter array recovery using a threshold-based variable number of gradients", *IS&T/SPIE Conference on Sensors, Cameras and Applications for Digital Photography*, San Jose California, Vol. 3650, 1999, pp. 36-43.
- [Cok86-1] D.R. COK, "Single-chip electronic color camera with color-dependent birefringent optical spatial frequency filter and red and blue signal interpolating circuit.", *US Patent 4,605,956*, to Eastman Kodak Compagny, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1986.
- [Cok86-2] D.R. COK, "Signal processing method and apparatus for sampled image signals", *US patent 4,630,307*, to Eastman Kodak Company, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1986.
- [Cok87] D.R. COK, "Signal processing method and apparatus for producing interpolated chrominance values in a sampled color image signal", *US Patent 4,642,678*, to Eastman Kodak Compagny, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1987.
- [Cok91-1] D.R. COK, "Mechanism for producing interpolated color values for a sampled color image signal using a linear equation technique", *US Patent 5,032,910*, to Eastman Kodak Company, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1991.
- [Cok91-2] D.R. COK, "Method of processing sampled signal valves produced by a color imaging device," *US patent 5,040,064*, to Eastman Kodak Company, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1991.
- [Cok94] D.R. COK, "Reconstruction of CCD Images Using Template Matching", *Proc. IS&T's 47th Annual Conference and Int'l Congress Photo. Sciences, (ICPS'94)*, 1994, pp. 380-385.
- [Crane99] H.D. CRANE, J.D. PETER, and E. MARTINEZ-URIEGAS, "Method and Apparatus for Decoding Spatiochromatically Multiplexed Color Images Using Predetermined Coefficients", *US patent 5,901,242*, to SRI International, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1999.
- [Dillon77] P. DILLON, "Color Imaging Array", *US Patent 4,047,203*, to Eastman Kodak Compagny, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1977.
- [Dillon79-1] P. DILLON, and B. BAYER, "Signal processing for Discrete-Sample-Type-Color-Video Signal", *US Patent 4,065,785*, to Eastman Kodak Compagny, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1979.
- [Dillon79-2] P. DILLON, and B. BAYER, "Signal processing for Discrete-Sample-Type-Color-Video Signal", *US Patent 4,176,373*, to Eastman Kodak Compagny, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1979.
- [Evans49] EVANS, "The birefringent filter", *Journal of Optical Society of America*, Vol. 39, 3, pp 229-242, 1949.
- [Freeman88-1] W.T. FREEMAN, "Median filter for reconstructing missing color samples", *US Patent 4,724,395*, to Polaroid Corporation, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1988.
- [Freeman88-2] W.T. FREEMAN, "Method and apparatus for reconstructing missing color samples", *US Patent 4,774,565*, to Polaroid Corporation, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1988.

- [Goltzbach01] J.W. GOLTZBACH, R.W. SCHAFER, and K. ILLGNER, "A method of color filter array interpolation with alias cancellation properties", *Proc. Int'l Conf. on Image Processing*, (ICIP'01), Thessaloniki, Greece, Oct. 2001, vol. 1, pp. 141-144.
- [Go00] J. GO, K. SOHN, and C LEE, "Interpolation using neural networks for digital still cameras," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, Vol. 46, no 3, 2000, pp. 610-616.
- [Greivenkamp86] J. GREIVENKAMP, "Optical spatial frequency filter", *US Patent 4,575,193*, to Eastman Kodak Company, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1986.
- [Greivenkamp90] J. GREIVENKAMP, "Color dependant optical prefilter for the suppression of aliasing artifacts", *Applied Optics*, vol. 29, no. 5, 1990, pp. 676-684.
- [Gunturk02] B.K. GUNTURK, Y. ALTUNBASAK, and R.M. MERSEREAU, "Color plane interpolation using alternating projections", *IEEE Trans. on Image Processing*, Vol. 11, no. 9, 2002, pp. 997-1013.
- [Gunturk04] B.K. GUNTURK, J.GOLTZBACH, Y. ALTUNBASAK, R.W. SCHAFER, and R.M. MERSEREAU, "Demosaicking : Color filter array interpolation in single-chip digital cameras", *IEEE Signal Processing Magazine*, Special Issue on Color Image Processing, to appears in 2004.
- [Gupta01] M. GUPTA and T. CHEN, "Vector Color Filter Array Demosaicing," *Proc. of the SPIE, Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications II*, Vol. 4306, San Jose, ed, CA, M. Blouke, J. Canosa, N. Sampat, 2001, pp. 374-382.
- [Hamilton97] J.F. HAMILTON Jr, and J.E. ADAMS Jr, "Adaptive color plan interpolation in single sensor color electronic camera", *US Patent 5,629,734*, to Eastman Kodak Company, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1997.
- [Hamilton00] J.F. HAMILTON Jr. and J.E. ADAMS Jr., "Computing Color Specification (Luminance and Chrominance) Values for Images", *US patent 6,075,889*, to Eastman Kodak Company, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 2000.
- [Herault96] J. HERAULT , "A model of colour processing in the retina of vertebrates : from photoreceptors to colour opposition and colour constancy", *Neurocomputing*, (1996).
- [Hibbard95] R.H HIBBARD, "Apparatus and method for adaptively interpolating a full color image utilizing luminance gradients.", *US patent 5,382,976*, to Eastman Kodak Company, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1995.
- [Inglis83] C.R. INGLING Jr. and E. MARTINEZ, "The spatiochromatic signal of the r-g channel", in *Colour Vision*, J.A. van Esch et al., ed., Academic Press London, 1983.
- [Keren99] D. KEREN and M. OSADCHY, "Restoring subsampled color images," *Machine Vision and Applications*, ed. Springer-Verlag, Vol. 11, 1999, pp. 197-202.
- [Kimmel99] R. KIMMEL, "Demosaicing : Image Reconstruction from Color Samples," *IEEE Trans. Image Processing*, Vol. 8, no. 9, 1999, pp. 1221-1228.
- [Kuno99] T. KUNO, H. SUGIURA and N. MATOBA, "New interpolation method using discriminated color correlation for digital still cameras," *IEEE Transaction on Consumer Electronics*, Vol. 45, no. 1, 1999, pp 259-267.
- [Laroche94] C.A. LAROCHE and M. A. PRESCOTT, "Apparatus and method for adaptively interpolating a full color image utilizing chrominance gradients.", *US patent 5,373,322*, to Eastman Kodak Company, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1994.

- [Lee01] B. LEE, K. SOHN, and C. LEE, "Performance comparison of various interpolation methods for color filter arrays", *Proc. Int'l Symposium on Industrial Electronics, (ISIE'01)*, Pusan, South Korea, 2001, Vol. 1, pp. 232-236.
- [Li01] X. LI and M. ORCHARD, "New edge-directed interpolation", *IEEE Trans. on Image Processing*, Vol. 10, no. 10, 2001, pp. 1521-1527.
- [Lu01] W. LU and Y.P. TAN, "Layering-based color filter array interpolation", *Proc. Int'l Conf. on Image Processing*, Thessaloniki, Greece, Vol.3, 2001, pp. 860-863.
- [Lu03] W. LU and Y.P. TAN, "Color filter array demosaicing : New method and performance measures", *IEEE Trans. Image Processing*, Vol. 12, no. 10, 2003, pp. 1194-1210.
- [Longere02] P. LONGERE, X. ZHANG, P.B. DELAHUNT, D.H. BRAINARD, "Perceptual assessment of demosaicing algorithm performance", *Proc. of the IEEE*, Vol. 90, no 1, January 2002, pp. 123-132.
- [Macovski68] A. MACOVSKI, "Monochrome photography system for color television", *US Patent 3,378,633*, to Stanford Research Inst., Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1968.
- [Martinez95] E. MARTINEZ-URIEGAS, H.D. CRANE and J.D. PETERS, "Method and apparatus for compression and decompression of digital color images" *US Patent 5,398,066*, to SRI International, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1995.
- [Mukherjee01] J. MUKHERJEE, M.S. MOORE and S.K. MITRA, "Color demosaicing with constrained buffering", *Proc. Int. Symp. on Signal Processing and its Application, ISSPA*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2001, pp. 52-55.
- [Muresan02] D. MURESAN and T. PARKS, "Optimal recovery demosaicing", *Proc. International Association of Science and Technology for Development (IASTED) Signal and Image Processing*, Hawaii, 2002.
- [Peters96] J.D. PETERS, H.D. CRANE and E. MARTINEZ-URIEGAS, "Method and apparatus for increasing resolution of digital color images using correlated decoding", *US patent 5,541,653*, to SRI International, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1996.
- [Pritchard71] D.H. PRITCHARD, "Adjustable bandwidth optical filter", *US Patent 3,588,224*, to RCA Corporation, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1971.
- [Ramanath02] R. RAMANATH and W.E. SNYDER and G.L. BILBRO, "Demosaicking Methods for Bayer Color Arrays," *J. of Electronic Imaging*, Vol. 11, no. 3, 2002, pp. 303-315.
- [Ramanath03] R. RAMANATH and W.E. SNYDER, "Adaptive Demosaicking," *J. of Electronic Imaging*, Vol. 12, no. 4, 2003, pp. 633-642.
- [Seve96] R. SÈVE, "Physique de la couleur : De l'apparence colorée à la technique colorimétrique", Masson, 1996
- [Taubman00] D. TAUBMAN, "Generalized Weiner reconstruction of images from colour sensor data using a scale invariant prior", *Proc. Int. Conf. Image Proc.*, (ICIP'00), Vancouver, BC, Canada, vol.3, 10-13 Sept. 2000, pp. 801-804.
- [Tao99] B. TAO, I. TASTL, T. COOPER, M. BLASGEN, and E. EDWARDS, "Demosaicing using human visual properties and wavelet interpolation filtering", *Proc. IS&T/SID Seventh Color Imaging Conference, (CIC'99)*, Scottsdale, Arizona, 1999, pp.252-256.
- [Topfer98] K. TOPFER, J.E. ADAMS, and B.W. KEELAN, "Modulation transfer functions and aliasing patterns of CFA interpolation algorithms", *Proc. IS&T, PICS*, Portland Oregon, 1998, pp. 367-370.

- [Trussell01] H. TRUSSELL, "A MMSE estimate for demosaicking", *Proc. IEEE Int. Conf. on Image Proc.*, 7- 11 Oct. 2001, Thessaloniki, Greece.
- [Trussell02] H. TRUSSELL and R.E. HARTWIG, "Mathematics for demosaicking", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 11, no 4, April 2002, pp. 495-492.
- [Weerasinghe02] C. WEERASINGHE, I. KHARITONENKO, and P. OGUNBONA, "Method of color interpolation in a single sensor color camera using green channel separation", *Proc. Int'l Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, (ICASSP'02), 2002, Vol. 4, pp. 3233-3236.
- [Weldy87] J.A. WELDY and S.H. KRISTY, "Single sensor color video camera with blurring filter", *US Patent 4,663,661*, to Eastman Kodak Company, Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 1987.
- [Weldy89] J.A. WELDY, "Optimized design for a single-sensor color electronic camera system", *SPIE Optical sensors and Electronic Photography*, vol. 1071, 1989, pp. 300-308.
- [Web] Des figures supplémentaires sont disponibles à [http://ivrgwww.epfl.ch/index.php?name=IEEE\\_Demosaicing](http://ivrgwww.epfl.ch/index.php?name=IEEE_Demosaicing)