

# Interpolation efficace d'images couleur sous-échantillonnées, par filtrage récursif.

Brice CHAIX DE LAVARÈNE<sup>1</sup>, David ALLEYSSON<sup>2</sup>, Barthélémy DURETTE<sup>1</sup>, Jeanny HÉRAULT<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GIPSA-Lab, Département Image et Signal,  
Université Joseph Fourier, Grenoble,

<sup>2</sup>Laboratoire de Psychologie et Neuro-Cognition,  
Université Pierre Mendès France, Grenoble.

brice.chaix@lis.inpg.fr, david.alleysson@upmf-grenoble.fr

**Résumé** – Nous présentons un algorithme de démosaïçage efficace basé sur un modèle luminance-chrominance de l'image acquise au travers d'une matrice de filtres couleur. Nous montrons que l'information de chrominance peut-être estimée par simple filtrage passe-bas. Cette approche nous permet d'utiliser des filtres récursifs, particulièrement adaptés pour le traitement temps-réel. De surcroît, tandis que la plupart des méthodes existantes sont spécifiques à une seule matrice (généralement la matrice de Bayer), notre algorithme s'applique à n'importe quel arrangement de filtres couleur. Nous proposons une version linéaire ainsi qu'une version adaptative.

**Abstract** – We present a computationally efficient demosaicing algorithm based on a luminance-chrominance model of the Color Filter Array (CFA) image. We show that the chrominance information can be estimated using simple low-pass filtering. This algorithm allows us to use separable recursive filters, which are particularly adapted for real-time processing. Moreover, while most of demosaicing algorithms are specific to a particular CFA (usually the popular Bayer CFA), our method can be applied to any CFA. We present a linear version of the algorithm and an adaptive extension.

## 1 Introduction

Dans la plupart des appareils photographiques numériques, l'information de couleur est acquise avec un unique capteur photosensible sur lequel est placé une matrice de filtres de couleur. L'image résultante ne possède qu'une seule information chromatique par pixel et doit être interpolée pour que l'image couleur puisse être visualisée. L'interpolation n'est généralement pas parfaite, et des artefacts de reconstruction peuvent apparaître [1]. La matrice (ou mosaïque) la plus couramment utilisée est celle proposée par Bayer en 1976 (Fig. 1).

On peut distinguer, dans la littérature, deux types d'approches : les méthodes *linéaires* et les méthodes *adaptatives* (ou non-linéaires), chacune correspondant à une caractéristique des images couleur. Les méthodes linéaires utilisent la corrélation spectrale des trois canaux chromatiques. Comme cette corrélation dépend des fonctions de sensibilité spectrale des filtres chromatiques et non du contenu de l'image, un algorithme linéaire peut être utilisé. Les méthodes adaptatives exploitent en plus la corrélation spatiale qui existe au sein des plans couleur. En effet il existe une plus grande corrélation entre des pixels situés le long d'un contour plutôt qu'en travers d'un contour. Les artefacts de reconstruction peuvent être significativement réduits en prenant en compte ces deux corrélations. Cependant, un algorithme adaptatif nécessitera une analyse du contenu de l'image, et donc la complexité algorithmique s'en trouvera accrue. A l'opposé, les méthodes simplement linéaires sont efficaces en temps de calcul, mais il peut res-

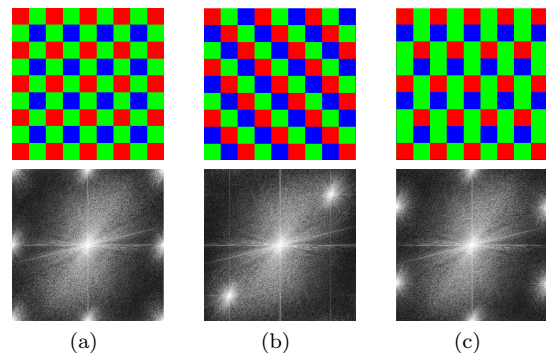


FIG. 1 – Mosaïques et spectres d'amplitude associés : (a) Bayer ; (b) bandes diagonales ; (c) Lukac [2]. La luminance est au centre du spectres, tandis que les chrominances sont modulées en hautes fréquences.

ter des artefacts de reconstruction dans les zones contenant des hautes fréquences spatiales. Le démosaïçage est donc un compromis entre la qualité souhaitée et le temps de calcul à disposition. Un compromis offrant une grande rapidité pour une qualité d'image soutenue est aujourd'hui extrêmement recherché avec l'avènement des capteurs d'image sur des systèmes embarqués disposant de faibles ressources matérielles. C'est par exemple le cas des téléphones mobiles. C'est dans ce contexte que nous proposons une méthode linéaire utilisant un filtrage récursif d'ordre 1. Nous proposons également une extension adaptative qui permet de réduire les artefacts de reconstruction.

En outre, les algorithmes d'interpolation existants sont

conçus pour une mosaïque spécifique, généralement la mosaïque de Bayer. La méthode que nous proposons ici s'applique sur n'importe quelle mosaïque, et en particulier sur des mosaïques pseudo-aléatoires, qui révèlent d'intéressantes propriétés en terme de réduction de fausses couleurs.

L'article est organisé comme suit. Nous rappelons tout d'abord le modèle spectral d'Alleysson *et al* [1] (Section 2). Nous décrivons ensuite notre nouvelle approche (Section 3). Nous discutons enfin son implémentation, sous formes linéaire et adaptative, utilisant des filtres récursifs (Section 4).

## 2 Modèle d'oppositions de couleur

Soit  $m$  la grille d'échantillonnage globale (ou mosaïque globale), sans distinction des différents types de filtres couleur. Nous nous restreignons au cas où  $m$  est une grille carrée d'impulsions de Dirac.  $m$  peut être décomposée en trois sous-mosaïque  $m_R$ ,  $m_V$  et  $m_B$  :

$$m = m_R + m_V + m_B \quad (1)$$

où  $m_i(x, y)$  vaut 1 ou 0 selon que le filtre de type  $i$  est présent ou non à la position spatiale  $(x, y)$  (avec  $i \in \{R, V, B\}$ ). Dans le domaine de Fourier, nous avons :

$$\hat{m} = \delta_0 \quad \text{et} \quad \begin{cases} \hat{m}_R = r_0\delta_0 + \sum_{n \neq 0} r_n\delta_n \\ \hat{m}_G = v_0\delta_0 + \sum_{n \neq 0} v_n\delta_n \\ \hat{m}_B = b_0\delta_0 + \sum_{n \neq 0} b_n\delta_n \end{cases} \quad (2)$$

où  $\delta_n$  est l'impulsion de Dirac à la fréquence spatiale  $n$ .  $r_0$ ,  $v_0$  et  $b_0$  sont les valeurs moyennes de chaque sous-mosaïque, ou en d'autres terme la probabilité à chaque pixel d'avoir le filtre de la couleur considérée. Appelons les  $p_R$ ,  $p_V$  et  $p_B$ . Par unicité de la transformée de Fourier, a :

$$\begin{cases} p_R + p_V + p_B = 1 \\ r_n + v_n + b_n = 0 \quad (\forall n \neq 0) \end{cases} \quad (3)$$

Soit  $I = \{C_R, C_V, C_B\}$  une image couleur (avec trois composantes chromatique), l'image en mosaïque associée (une image à une seule intensité par pixel) est obtenue par :

$$I_m(x, y) = \sum_{i \in \{R, V, B\}} C_i(x, y) \cdot m_i(x, y) \quad (4)$$

et sa transformée de Fourier est :

$$\hat{I}_m(\nu) = \underbrace{\sum_i p_i \hat{C}_i(\nu)}_{\hat{\phi}(\nu)} + \sum_{n \neq 0} \underbrace{\begin{matrix} r_n \hat{C}_R(n - \nu) \\ v_n \hat{C}_V(n - \nu) \\ b_n \hat{C}_B(n - \nu) \end{matrix}}_{\hat{\psi}_n(n - \nu)} \quad (5)$$

$\phi$  est une combinaison linéaire à coefficients positifs des trois canaux couleur. Ce terme est donc une luminance.  $\psi_n(n - \nu)$  est également une combinaison linéaire des canaux couleur mais dont la somme des coefficients s'annule, et modulée à la fréquence  $n$ . C'est donc une chrominance modulée. La Fig. 1 montre trois exemples de mosaïques

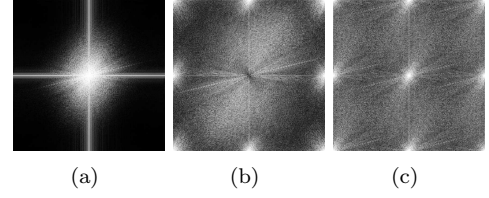


FIG. 2 – Spectres d'amplitude pour le cas de Bayer : (a) BF de luminance  $\phi^{BF}$ ; (b) HF de l'image en mosaïque  $I_m^{HF}$ , (c) canal R de  $I_m^{HF}$  démultiplexée.

ainsi que les spectres d'amplitude d'une image échantillonnées par ces mosaïques. Ce modèle a été utilisé pour le cas de la mosaïque de Bayer dans une approche linéaire et spatialement invariante [1], ainsi que dans deux approches adaptatives [3, 4].

## 3 Nouvelle approche

Soit  $f$  un filtre passe-bas dont les caractéristiques seront spécifiées plus tard. Appelons  $I_m^{PB}$  l'image en mosaïque filtrée par  $f$  (\* étant le produit de convolution) :

$$I_m^{BF} = f * I_m \quad (6)$$

En utilisant l'équation 5 et le fait que les chrominances sont modulées en hautes fréquences, nous avons :

$$f * \sum_{n \neq 0} \psi_n = 0 \quad \Rightarrow \quad I_m^{BF} = f * \phi \quad (7)$$

Ceci est vérifié si la fréquence de coupure  $f_c$  de  $f$  est inférieure à  $(n - f_{max})$ , avec  $f_{max}$  la fréquence maximale de chrominance.  $I_m^{BF}$  contient donc une estimation passe-bas (mais exempte de repliement spectral) de la luminance  $\phi$  (Fig. 2(a)). Appelons la  $\phi^{BF}$ . Soit  $I_m^{HF}$  le signal complémentaire (Fig. 2(b)) :

$$I_m^{HF} = I_m - \phi^{BF} \quad (8)$$

D'après la représentation fréquentielle d'une image en mosaïque (5),  $I_m^{HF}$  porte les oppositions de couleur modulées en hautes fréquences ainsi que les détails de luminance (les hautes fréquences de luminance  $\phi^{HF}$ ). Dans le domaine fréquentiel nous avons :

$$\hat{I}_m^{HF}(\nu) = \hat{\phi}^{HF}(\nu) + \sum_{n \neq 0} \hat{\psi}_n(n - \nu) \quad (9)$$

avec  $\phi = \phi^{BF} + \phi^{HF}$ . Etudions maintenant le demultiplexage de  $I_m^{HF}$ . Le demultiplexage d'une image en mosaïque est la passage d'une image en niveau de gris vers une image à trois plans couleur, avec toujours une seule information chromatique par pixel. Ceci revient à multiplier l'image en mosaïque par ses sous-mosaïques  $m_i$  :

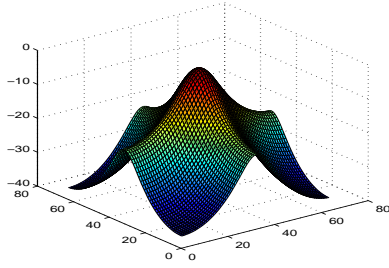
$$\{I_m^{HF}\}_i(x, y) = I_m^{HF}(x, y) m_i(x, y) \quad (10)$$

En utilisant (8), il vient :

$$\{I_m^{HF}\}_i = I_m m_i - \phi^{BF} m_i \quad (11)$$

Or  $I_m m_i = C_i m_i$ , et  $C_i = \phi + \psi_i$ . Nous avons donc :

$$\begin{aligned} \{I_m^{HF}\}_i &= (\phi + \psi_i) m_i - \phi^{BF} m_i \\ &= (\phi^{HF} + \psi_i) m_i \end{aligned} \quad (12)$$

FIG. 3 – Réponse fréquentielle du filtre IIR  $F$  (dB).

La sous-mosaïque  $m_i$  peut être décomposée en la somme d'un terme constant  $i_0$  et d'un partie variant  $\tilde{m}_i$  (cf. Eqn. (2)) :

$$\{I_m^{HF}\}_i = \underbrace{p_i(\phi^{HF} + \psi_i)}_{\text{bande de base}} + \underbrace{\tilde{m}_i(\phi^{HF} + \psi_i)}_{\text{modulé}} \quad (13)$$

Deux termes apparaissent dans cette dernière expression : l'un est en bande de base, l'autre est modulé en hautes fréquences (Fig. 2(c)). De plus, si  $f_c$  est choisie de manière à être supérieure ou égale à la fréquence de coupure du signal de chrominance, alors  $\phi^{HF}$  et  $\psi_i$  sont à supports disjoints. Par conséquent, un simple filtrage passe-bas normalisé par  $p_i$  permet de retrouver les composantes de chrominance de l'image couleur. En pratique nous utilisons le même filtre  $f$  pour le préfiltrage et pour l'estimation de la chrominance :

$$\psi_i = \frac{1}{p_i} f * \{I_m^{HF}\}_i \quad (14)$$

Connaissant l'image en mosaïque et les composantes de chrominance, on retrouve aisément la luminance par remodulation de la chrominance puis par soustraction :

$$\phi = I_m - \sum_{i \in \{R, V, B\}} \psi_i m_i \quad (15)$$

Bien sûr, une reconstruction sans erreur est illusoire. En pratique il y a toujours du repliement spectral entre la luminance et la chrominance, s'exprimant par des fausses couleurs et/ou un effet de grille. Une extension adaptative permettant de réduire l'effet de grille est présentée dans la section suivante.

Pour résumer, notre approche se divise en 5 étapes :

1. séparation de l'image  $I_m$  en une composante de basse fréquence  $\phi^{BF}$  et une de haute fréquence  $I_m^{HF}$ ,
2. démultiplexage de la composante hautes fréquences,
3. filtrage passe-bas de chaque plan couleur pour obtenir les composantes  $\psi_R$ ,  $\psi_V$  et  $\psi_B$ ,
4. soustraction des chrominances "remodulées" à l'image en mosaïque, afin d'obtenir la luminance  $\phi$ ,
5. addition de la luminance aux chrominances pour obtenir les plans couleur  $C_R$ ,  $C_V$  et  $C_B$ .

## 4 Implémentation

### 4.1 Méthode linéaire

L'élément déterminant de l'implémentation de la méthode linéaire est le choix du filtre  $f$ .  $f$  a pour seule



FIG. 4 – Extraits d'une image interpolée avec l'algorithme linéaire (en haut), avec l'algorithme adaptatif (en bas) ; De gauche à droite : mosaïque de Bayer, mosaïque à bandes diagonales et mosaïque de Lukac.

contrainte d'être passe-bas, avec une fréquence de coupure égale à la largeur de bande de la chrominance. Pour des raisons de rapidité d'exécution, nous avons choisi de l'implémenter sous forme de filtre séparable récursif dont la transformée en  $z = (z_1, z_2)$  est de la forme  $F(z_1, z_2) = F_1(z_1)F_2(z_2)$  avec :

$$F_k(z_k) = \frac{1-a}{1+a} \frac{1}{1-az_k^{-1}} \frac{1}{1-az_k} \quad (k \in \{1, 2\}) \quad (16)$$

$F$  est d'ordre 1 dans les directions horizontales et verticales (dans les sens causaux et anticausaux) et fait donc intervenir uniquement les quatre plus proches voisins. Sa réponse fréquentielle est représentée Fig. 3.  $F$  atténue bien plus dans les directions diagonales que dans les directions horizontales et verticales. Ainsi, un numérateur d'ordre 1 devra être utilisé dans le cas d'une mosaïque qui module la chrominance dans ces directions (c'est le cas pour la mosaïque de Bayer).

Le paramètre  $a$  contrôle la fréquence de coupure de  $F$ , et détermine le compromis entre les fausses couleurs et l'effet de grille. Pour la base d'image Kodak (largement utilisée dans la communauté), nous avons obtenu empiriquement  $a = 0.5$  pour la mosaïque de Bayer.

Il est à noter que le filtrage de la chrominance décrit dans la partie précédente fait intervenir les densités de filtres  $p_i$ . Dans le cas de la mosaïque de Bayer ces valeurs sont constantes sur l'ensemble de l'image et sont égales respectivement à 0.25, 0.5 et 0.25 pour  $C_R$ ,  $C_V$ , et  $C_B$ . Cependant, dans le cas général, ces densités peuvent varier localement autour de leur valeur moyenne. Ceci doit être pris en compte lors du filtrage, par une normalisation :

$$\psi_i = \frac{f * \{I_m^{HF}\}_i}{f * m_i} \quad (17)$$

Cette technique est appelée convolution normalisée [5], et a fait l'objet d'une communication pour l'estimation de la luminance basse fréquence dans le cas d'une mosaïque irrégulière [6].

### 4.2 Extension adaptative

La luminance passe-bas  $\phi^{BF}$ , qui est préalablement extraite de l'image en mosaïque, peut-être utilisée dans la perspective d'un algorithme adaptatif aux contours. L'ex-

exploitation de cette information “basse fréquence” peut sembler sous-optimale par rapport aux autres méthodes existantes qui font une détection de contour directement sur l’image en mosaïque ([3,7]). Cependant ces méthodes font intervenir des gradients entre pixels issus du même type de filtre couleur (R, V ou B), qui ne sont pas adjacents sur la mosaïque. Le gradient est donc nécessairement à une échelle plus faible que celle de l’image en mosaïque. Ainsi, la luminance  $\phi^{BF}$  contient la même quantité d’information spatiale. De plus,  $\phi^{BF}$  a le grand avantage d’être totalement indépendant de la mosaïque, puisque c’est une information purement spatiale. Ainsi la détection de contour sera valable quelque soit l’arrangement spatial de la mosaïque. Nous calculons les gradients horizontaux et verticaux afin de choisir la direction de filtrage.

Nous proposons une méthode adaptative volontairement simple, afin de ne pas trop augmenter le temps de calcul. Cette méthode consiste à rendre l’interpolation de la chrominance adaptative aux contours. Nous calculons les gradients horizontaux et verticaux de  $\phi^{BF}$ . Ces gradients sont utilisés pour le choix de la direction de filtrage de chrominance ( $F_1$  ou  $F_2$ ). Des résidus de luminance sont alors retranchés des chrominances interpolées. Comme pour les autres méthodes adaptatives, une étape de post-traitement améliore la qualité du résultat, du fait d’erreurs potentielles dans le choix de la direction de filtrage. Une solution est d’itérer le calcul les valeurs de chrominance à partir de la luminance estimée.

### 4.3 Résultats

Nous avons reporté dans la table 1 les valeurs de PSNR de notre méthode et de celles de méthodes issues de la littérature, ainsi qu’une estimation des complexités en terme d’opérations par pixel.

La version linéaire présente la même qualité que [1], mais réduit considérablement le temps de calcul. La complexité est de 22 op./pixel (pour la cas de Bayer, il faut rajouter un préfiltrage bilinéaire).

La méthode adaptative réduit significativement l’effet de grille présent avec la méthode linéaire (Fig. 5(b)). Bien que les résultats soient meilleurs visuellement, le PSNR est sensiblement le même que pour la version linéaire. Ceci peut provenir du fait que la méthode adaptative est très simple. Une solution plus sophistiquée devrait donner une meilleure qualité objective.

Il est intéressant de remarquer que la qualité visuelle n’est pas la même avec toutes les mosaïques. Les mosaïques pseudo-aléatoire présentent d’intéressantes propriétés en terme de réduction des fausses couleurs dans les régions de hautes fréquences (Fig. 5).

TAB. 1 – Valeurs de PSNR (dB) et complexité (op./pix.)

	Methode linéaires		Methodes adaptatives		
	Proposée	[1]	Proposée	[3]	[7]
R	37.9	37.8	38.2	38.8	38.4
V	40.5	40.7	40.6	42.1	41.4
B	36.7	36.5	37.0	38.6	37.5
op/pix	25	77	50	63	405



FIG. 5 – Reconstruction à partir de la mosaïque de Bayer (left) et à partir d’une mosaïque pseudo-aléatoire (right). Illustration de l’effet de suppression des fausses couleurs par une échantillonnage irrégulier.

## 5 Conclusion

Nous avons présenté une nouvelle méthode de démosaïchage applicable à n’importe quelle configuration de mosaïque. La version linéaire est extrêmement peu coûteuse en temps de calcul. La version adaptative donne des résultats intéressants, en particulier sur des mosaïques pseudo-aléatoire, mais devrait pouvoir être améliorée par une exploitation plus sophistiquée des contours.

Cet algorithme utilise une analogie avec le système visuel. La rétine humaine fournit une estimation basse fréquence achromatique de l’image issue de la mosaïque des cones via la voie magno-cellulaire. Cette voie est supposée préparer l’information pour le cerveau avant l’arrivée de la voie parvo-cellulaire, contenant les détails de luminance et les oppositions de couleur.

## Références

- [1] D. Alleysson, S. Süsstrunk, and J. Hérault, “Linear color demosaicing inspired by the human visual system,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 14, pp. 439–449, April 2005.
- [2] R. Lukac and K. N. Plataniotis, “Universal demosaicking for imaging pipelines with an rgb color filter array,” *Pattern Recognition*, vol. 38, pp. 2208–2212, November 2005.
- [3] N. Lian, L. Chang, and Y.-P. Tan, “Improved color filter array demosaicking by accurate luminance estimation,” in *IEEE ICIP*, vol. 1, Sep. 2005, pp. 41–44.
- [4] E. Dubois, “Frequency-domain methods for demosaicking of bayer-sampled color images,” *IEEE Signal Proc. Letters*, vol. 12, pp. 847–850, Dec. 2005.
- [5] H. Knutsson and C.-F. Westin, “Normalized and differential convolution,” in *Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings CVPR ’93*, 15-17 June 1993, pp. 515–523.
- [6] B. C. de Lavarène, D. Alleysson, and J. Hérault, “Traitement non linéaire uniforme pour la reconstruction d’une mosaïque chromatique répartie aléatoirement,” in *GRETSI’05, Louvain-La-Neuve*, Septembre 2005.
- [7] B. Gunturk, Y. Altunbasak, and R. Mersereau, “Color plane interpolation using alternating projections,” *IEEE Trans. on Im. Proc.*, vol. 11, no. 9, Sep. 2002.