

# TI – Traitement d'Images

## Semaine 11 : Acquisition d'images couleur et dématricage

*Olivier Losson*

**Master ASE** : <http://master-ase.univ-lille1.fr>  
**Master Informatique** : <http://www.fil.univ-lille1.fr>  
**Spécialité IVI** : <http://master-ivi.univ-lille1.fr>

## Plan du cours

- **1 – Problématique du dématriçage**
  - charge coupled device Capteurs 3CCD et 1CCD pour l'acquisition d'images couleur
  - CFA et images CFA
  - De l'image CFA à l'image couleur estimée : formalisation du dématriçage
- **2 – Introduction aux méthodes de dématriçage**
  - Dématriçage par copie de pixels, par interpolation bilinéaire
  - Artefacts de dématriçage
  - Principales hypothèses de dématriçage
- **3 – Méthodes de dématriçage avancées**
  - Méthodes exploitant la corrélation spatiale
  - Méthodes fréquentielles
  - Critères et évaluation de la qualité
- **Sélection de références**

## Acquisition d'images couleur (1/3)

- Une image numérique couleur

- ➔ possède 3 composantes (**R**, **G**, **B**) par pixel
- ➔ est définie par 3 *plans* couleur



=



**Plan R**



**Plan G**



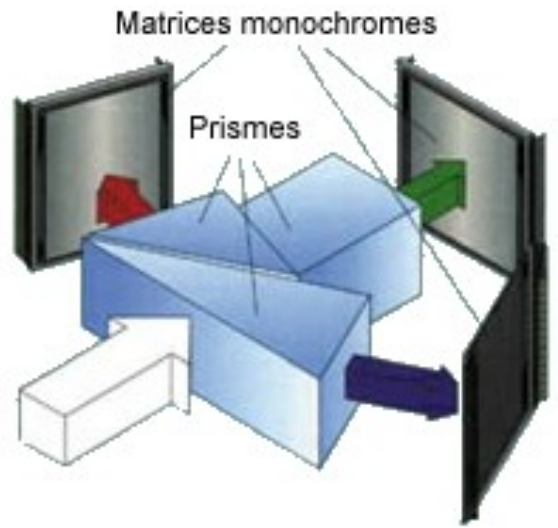
**Plan B**

## Acquisition d'images couleur (2/3)

### • Caméras 3CCD

charge coupled device

#### → Système à prismes dichroïques



Scène

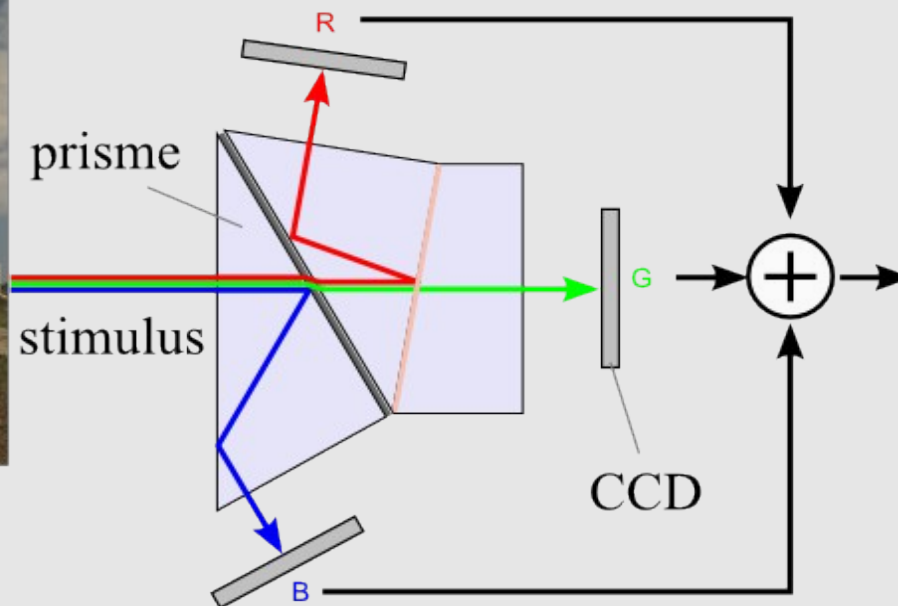


Image couleur



## Acquisition d'images couleur (3/3)

### • Caméras 1CCD

#### → Système à mosaïque de filtres couleur monochromatiques



Scène

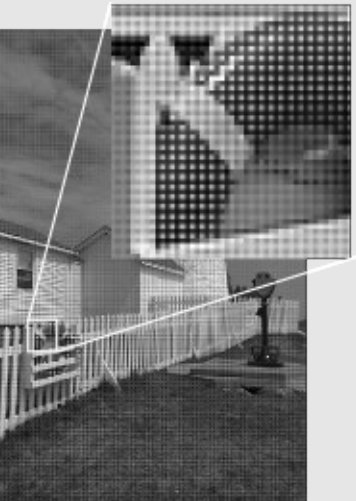
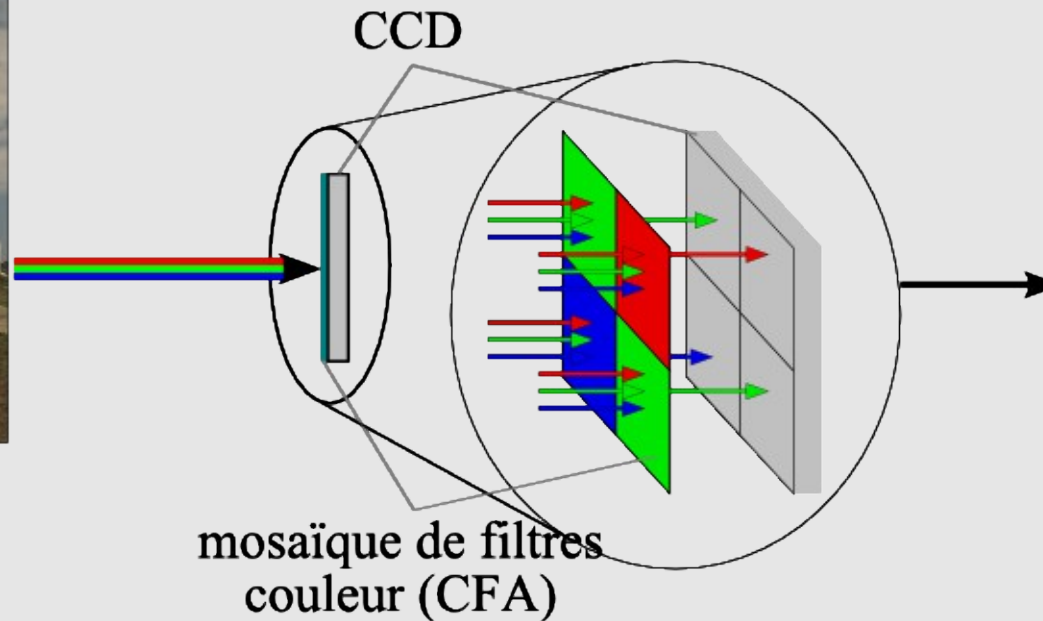
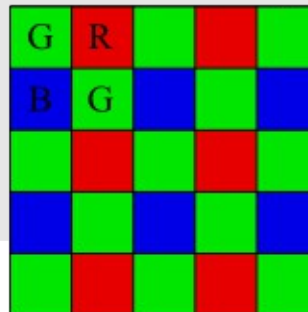


Image CFA

mosaïque de filtres  
couleur (CFA)

ex.: CFA de Bayer



**CFA = Color  
Filter Array**

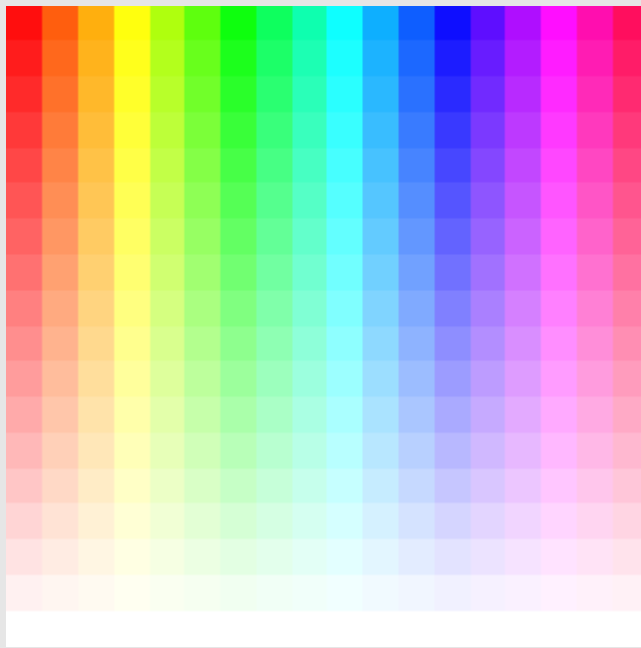
## CFA et images CFA (1/2)

- **Image CFA**

- ➔ Seul 1 niveau de composante est connu en chaque pixel
- ➔ Dépend des filtres du CFA et de leur disposition

- **Exemple**

« Scène »



Filtrée par CFA

triangle du dessus = filtre  
triangle du bas = couleur scene

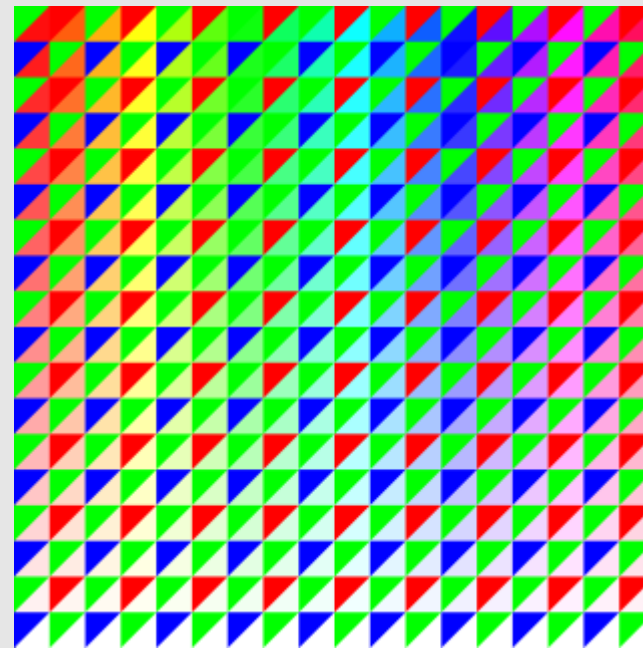
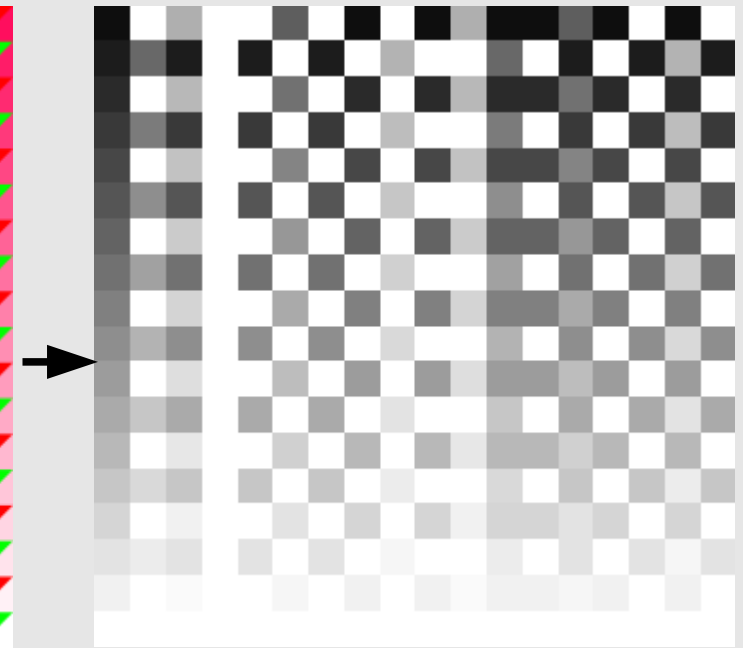
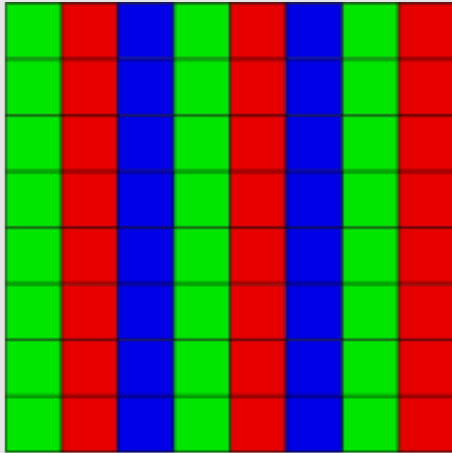


Image CFA

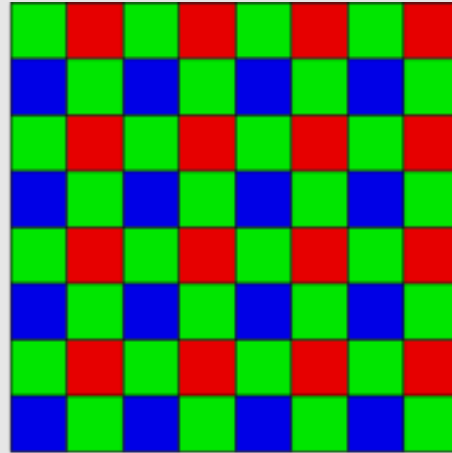


## CFA et images CFA (2/2)

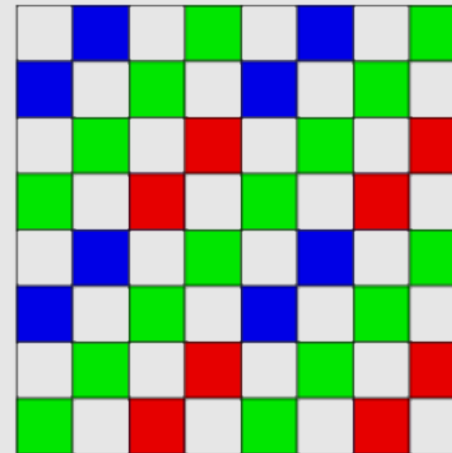
### • Différents types de CFA



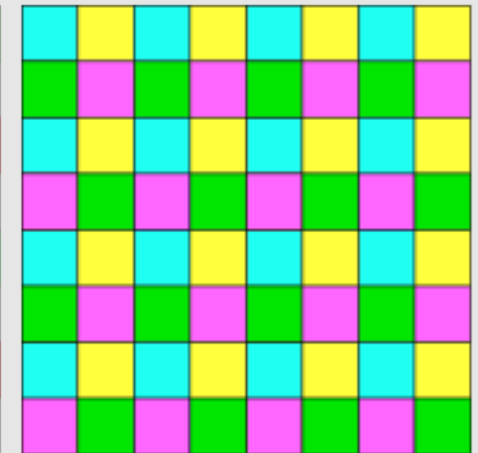
**Bandes verticales**



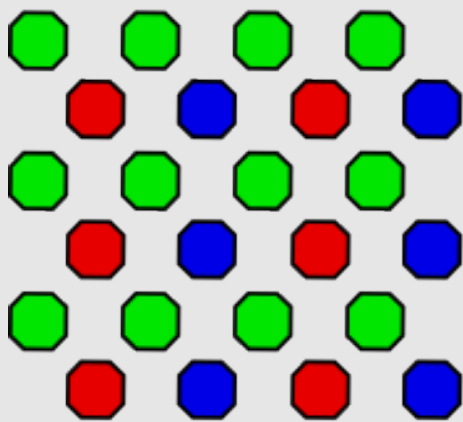
**Bayer**



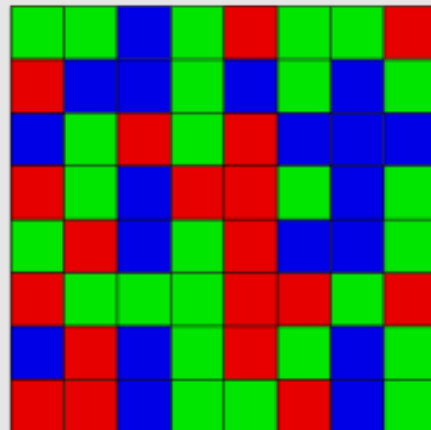
**CFA 2.0 (Kodak)**



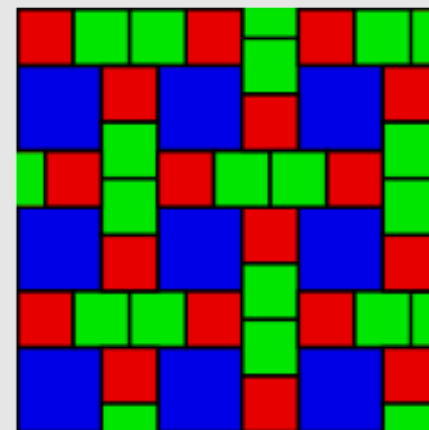
**Couleurs complém.**



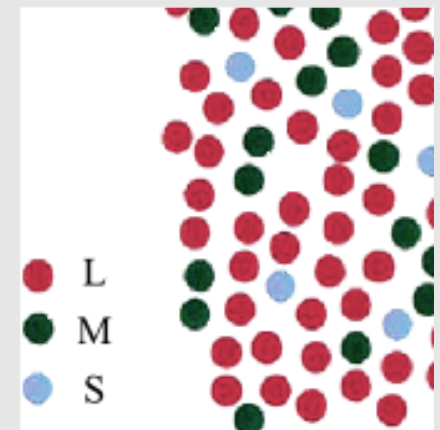
**SuperCCD (Fuji)**



**Pseudo-aléatoire**



**« Burtoni »**



**Rétine humaine**

L = large (rouge)  
M = medium (vert)  
S = short (bleu)

## De l'image CFA à l'image couleur (1/3)

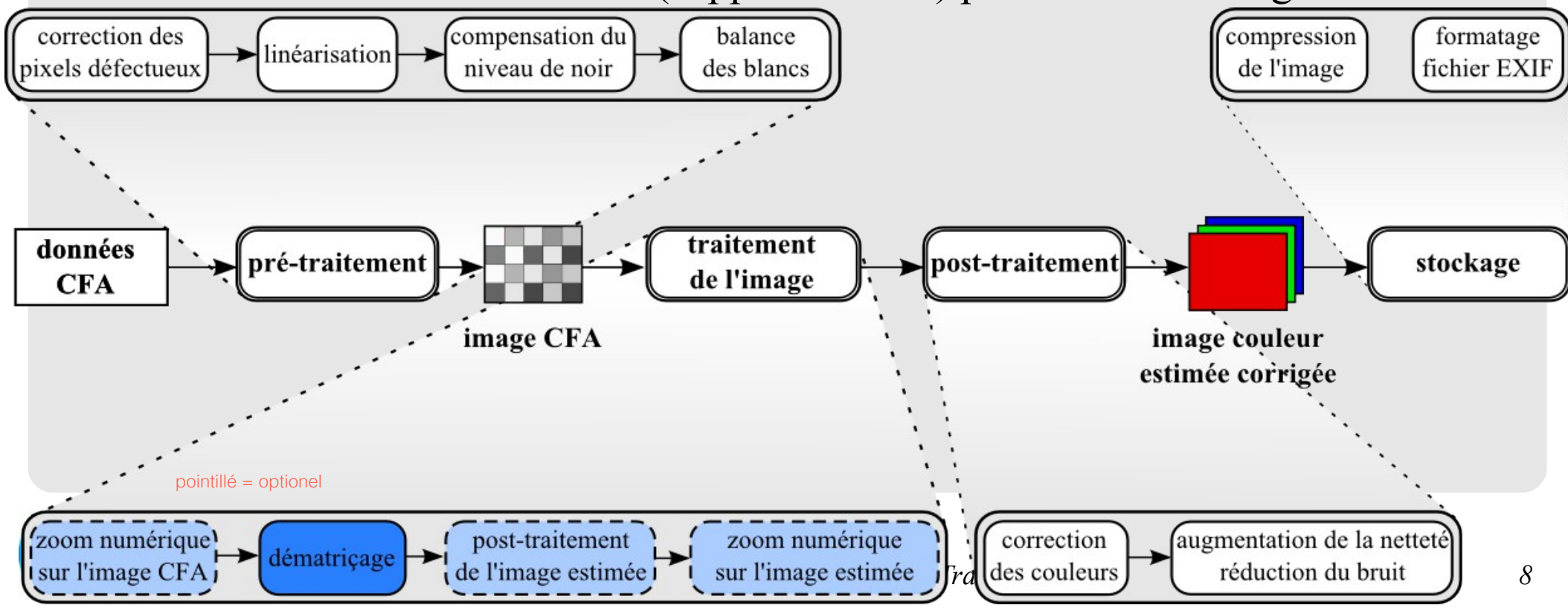
### • 3CCD vs. 1CCD

#### → 3CCD

- 👍 fournissent directement une image couleur
- 👎 prismes délicats à ajuster, électronique plus complexe  $\Rightarrow$  coûteux

#### → 1CCD

- 👍 un seul capteur (*single-chip*)  $\Rightarrow$  bon marché, grand public
- 👎 nécessitent un traitement (supplémentaire) pour obtenir l'image couleur

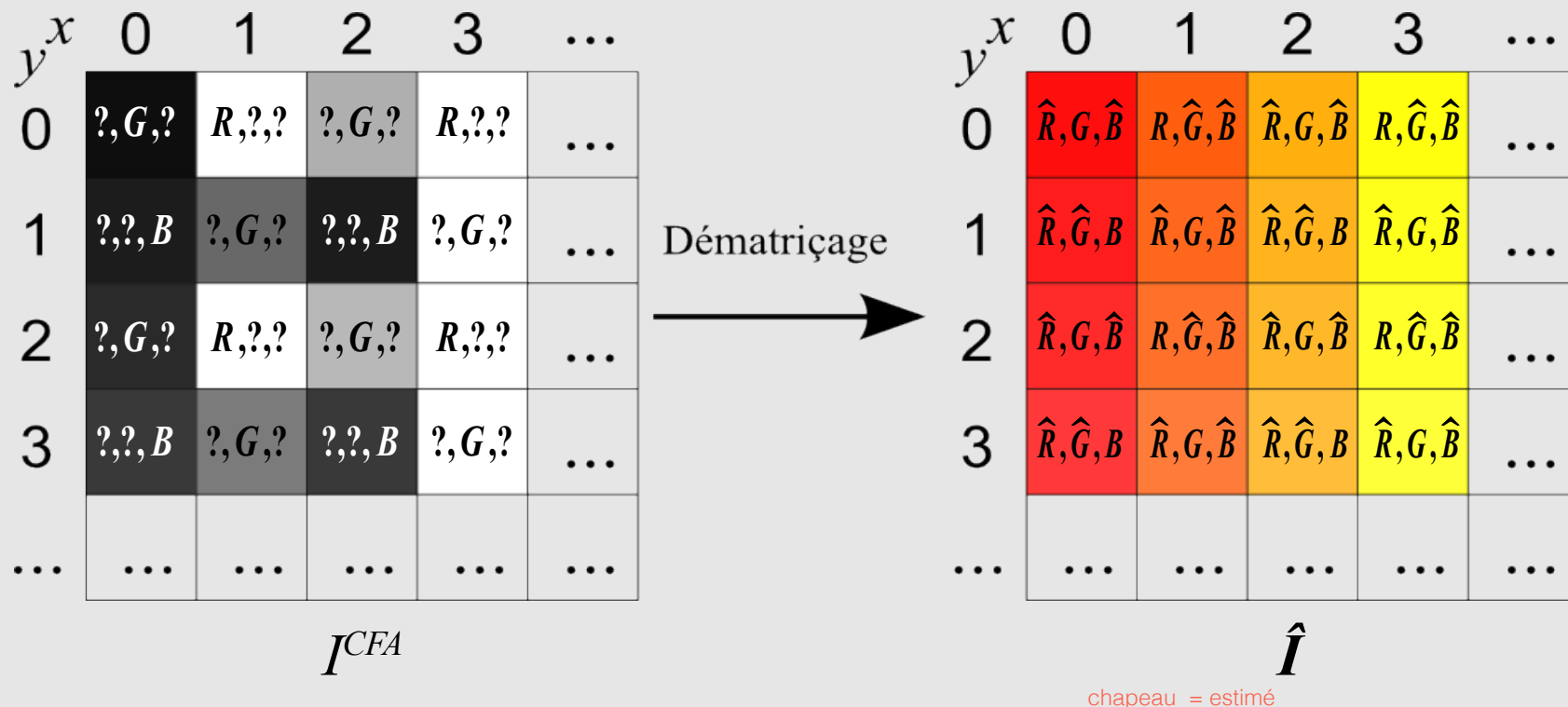




## De l'image CFA à l'image couleur (2/3)

### Formalisation du dématricage

- À partir de l'image CFA  $I^{CFA}$  dans laquelle 1 seul niveau de composante (**R** ou **G** ou **B**) est connu en chaque pixel,
- On forme une image couleur  $\hat{I}$  dans laquelle les 3 niveaux de composantes (**R**, **G** et **B**) sont connus en chaque pixel, 2 d'entre eux étant estimés.



## De l'image CFA à l'image couleur (3/3)

### Formalisation du dématricage

#### Formalisme utilisé

- Désignation du pixel de coordonnées  $(x, y)$ , avec  $0 \leq x < w$  et  $0 \leq y < h$ 
  - générique  $P(x, y)$  ou  $P_{x,y}$
  - d'une image en niveaux de gris  $I(x, y)$  ou  $I_{x,y}$
  - d'une image couleur  $I(x, y)$  ou  $I_{x,y}$
  - d'un plan de composante d'une image couleur  $I^k(x, y)$  ou  $I_{x,y}^k$ ,  $k \in \{R, G, B\}$

- Image CFA

$$I_{x,y}^{CFA} = \begin{cases} R_{x,y} & \text{si } x \text{ impair et } y \text{ pair} \\ B_{x,y} & \text{si } x \text{ pair et } y \text{ impair} \\ G_{x,y} & \text{sinon} \end{cases}$$

	0	1	2
0	G	R	...
1	B	G	...
2	...	...	...

- Image estimée

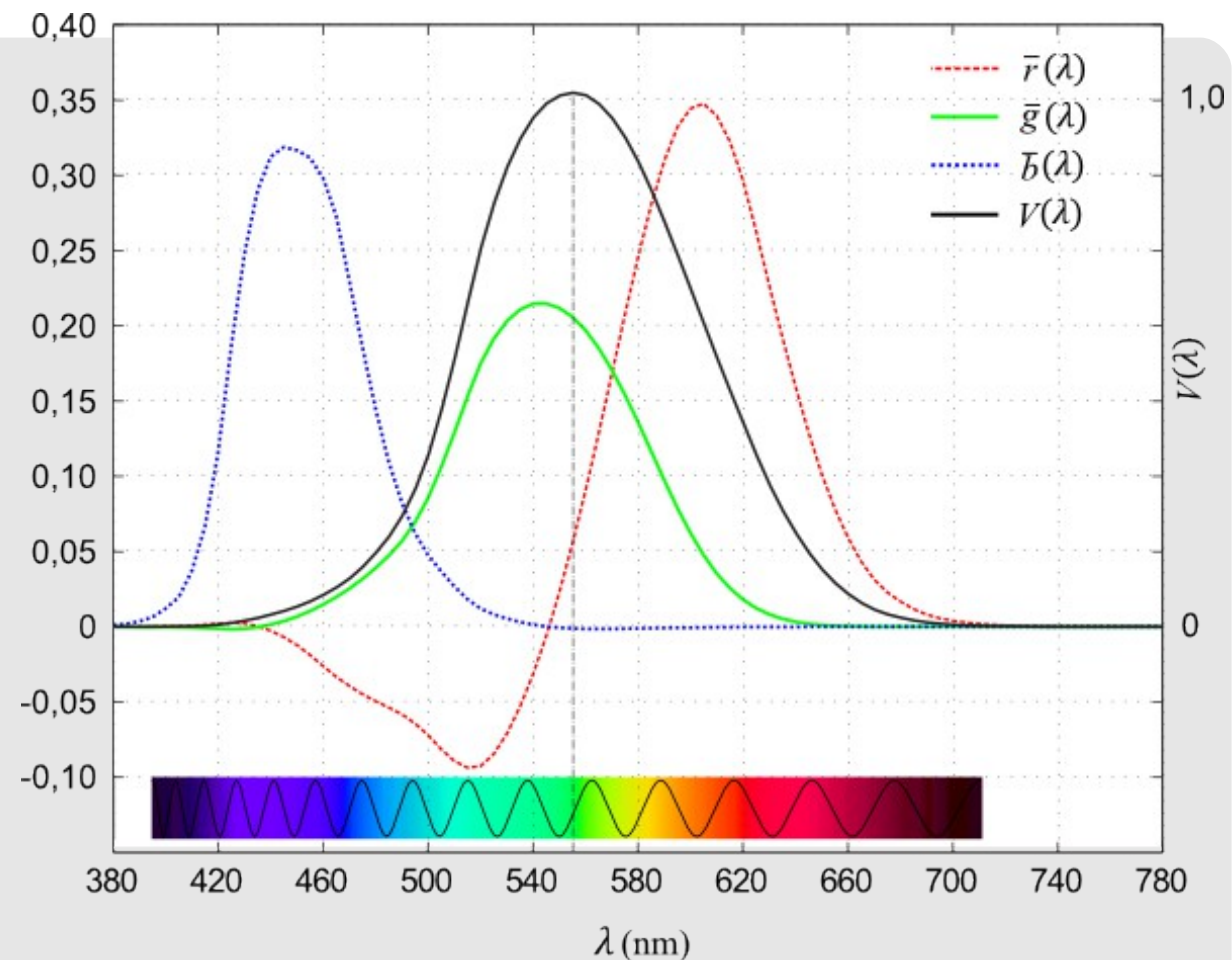
$$\hat{I}_{x,y} = \begin{cases} (R_{x,y}, \hat{G}_{x,y}, \hat{B}_{x,y}) & \text{si } x \text{ impair et } y \text{ pair} \\ (\hat{R}_{x,y}, \hat{G}_{x,y}, B_{x,y}) & \text{si } x \text{ pair et } y \text{ impair} \\ (\hat{R}_{x,y}, G_{x,y}, \hat{B}_{x,y}) & \text{sinon} \end{cases}$$

*Cas du CFA  
de Bayer*

# Introduction aux méthodes de dématricage (1/3)

## • CFA de Bayer (1976)

- Hypothèses :  
la luminance  
(*intensité lumineuse*)  
est représentée par  
la composante **G**,  
la chrominance  
(*information de couleur*)  
par **R** et **B**.



- La sensibilité spectrale  $V(\lambda)$  de l'œil humain en vision photopique est maximale autour de  $\lambda=555$  nm  
⇒ 2 fois plus d'échantillons **G** que de **R** et **B**.



## Introduction aux méthodes de dématrissage (2/3)

### Configurations rencontrées dans le CFA de Bayer

$B_{-1,-1}$	$G_{0,-1}$	$B_{1,-1}$
$G_{-1,0}$	$R_{0,0}$	$G_{1,0}$
$B_{-1,1}$	$G_{0,1}$	$B_{1,1}$

{GRG}

$R_{-1,-1}$	$G_{0,-1}$	$R_{1,-1}$
$G_{-1,0}$	$B_{0,0}$	$G_{1,0}$
$R_{-1,1}$	$G_{0,1}$	$R_{1,1}$

{GBG}

$G_{-1,-1}$	$B_{0,-1}$	$G_{1,-1}$
$R_{-1,0}$	$G_{0,0}$	$R_{1,0}$
$G_{-1,1}$	$B_{0,1}$	$G_{1,1}$

{RGR}

$G_{-1,-1}$	$R_{0,-1}$	$G_{1,-1}$
$B_{-1,0}$	$G_{0,0}$	$B_{1,0}$
$G_{-1,1}$	$R_{0,1}$	$G_{1,1}$

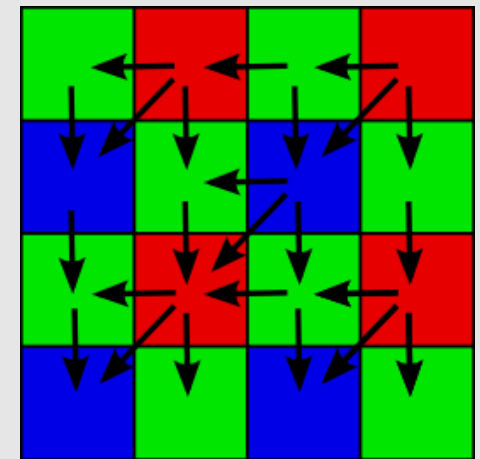
{BGB}

### Dématrissage par « copie de pixel »

- En un pixel, une composante manquante est recopiée à partir des pixels proches où elle est disponible.

$$\{\text{GRG}\} : \hat{G} = G_{1,0}, \hat{B} = B_{1,-1} \quad \{\text{GBG}\} : \hat{G} = G_{1,0}, \hat{R} = R_{1,-1}$$

$$\{\text{RGR}\} : \hat{R} = R_{1,0}, \hat{B} = B_{0,-1} \quad \{\text{BGB}\} : \hat{R} = R_{0,-1}, \hat{B} = B_{1,0}$$



## Introduction aux méthodes de dématricage (3/3)

### • Dématricage par interpolation bilinéaire

Utilisation d'un voisinage 3x3

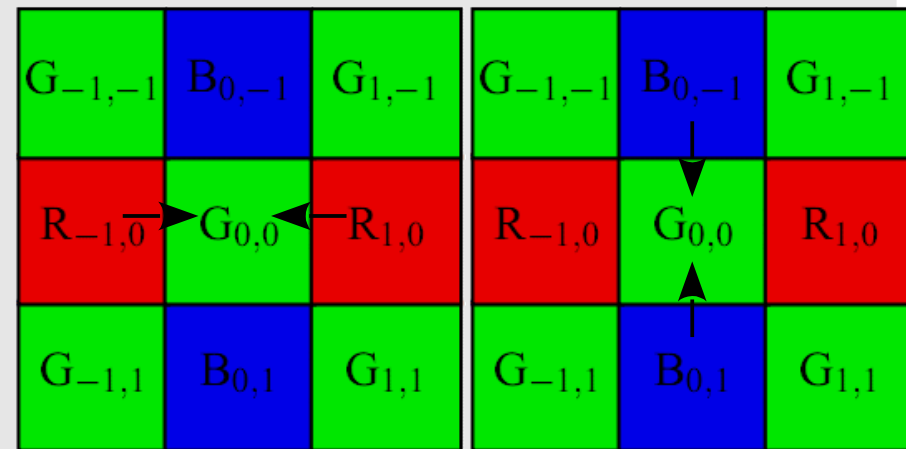
#### → Configuration {GRG} (id. en {GBG}) :

$$\begin{cases} \hat{B} &= \frac{1}{4}(B_{-1,-1} + B_{1,-1} + B_{-1,1} + B_{1,1}) \\ \hat{G} &= \frac{1}{4}(G_{0,-1} + G_{-1,0} + G_{1,0} + G_{0,1}) \end{cases}$$



#### → Configuration {RGR} (id. en {BGB}) :

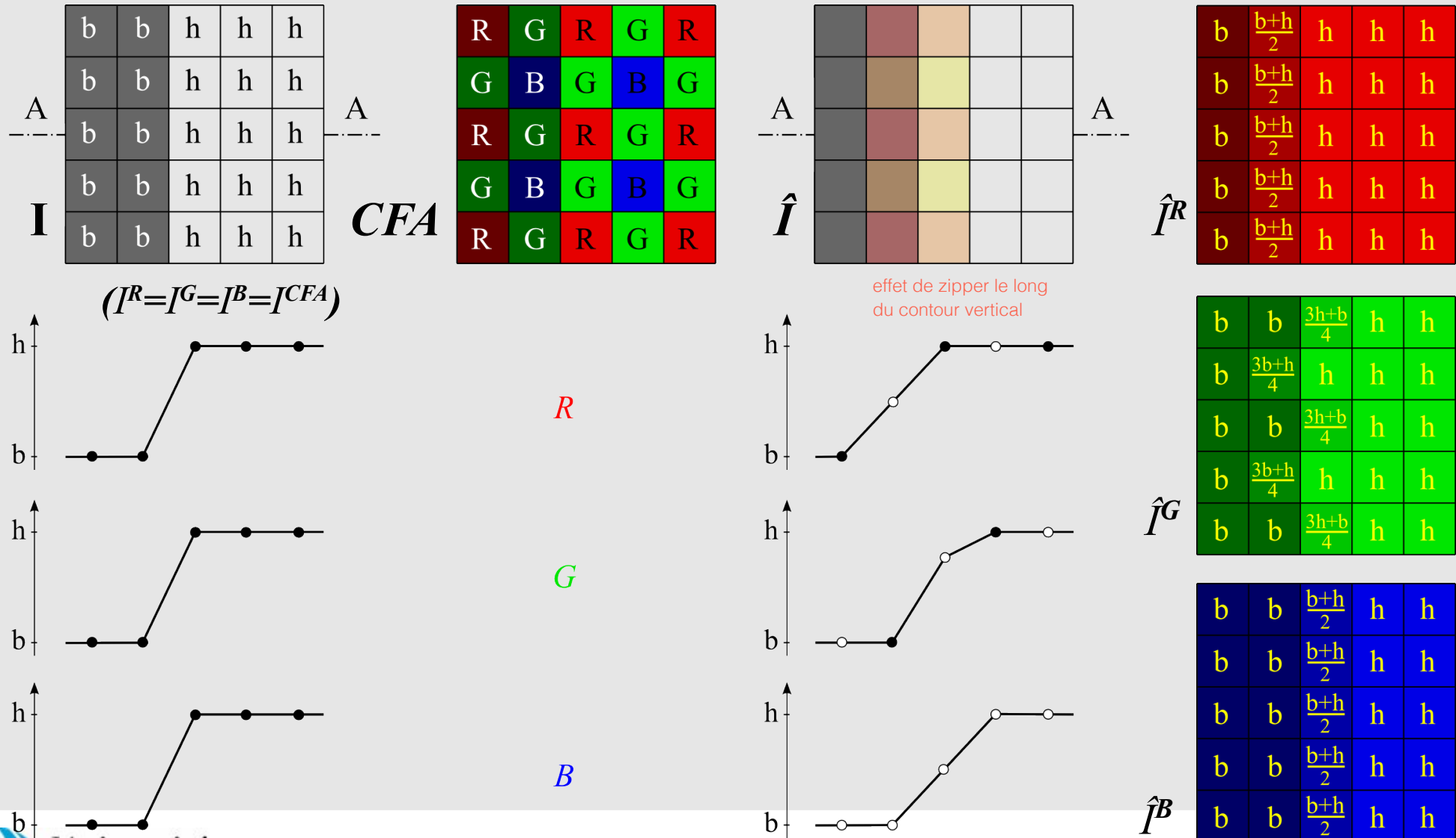
$$\begin{cases} \hat{R} &= \frac{1}{2}(R_{-1,0} + R_{1,0}) \\ \hat{B} &= \frac{1}{2}(B_{0,-1} + B_{0,1}) \end{cases}$$





# Artefacts de dématricage (1/3)

## Illustration des artefacts générés par l'interpolation bilinéaire



## Artefacts de dématricage (2/3)

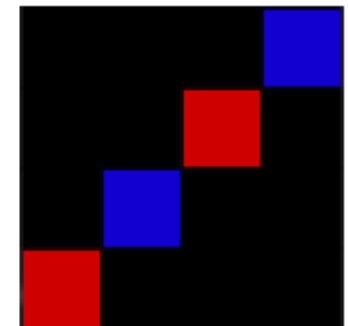
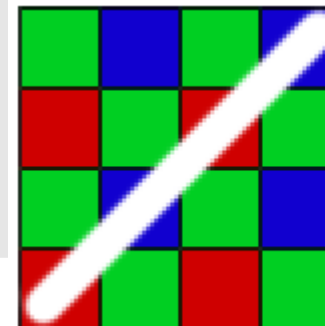
### • Artefacts caractéristiques du dématricage (1/2)

#### → Couleurs aberrantes (« Fausses couleurs »)

- symptôme : écart important entre la couleur de référence et celle estimée



- localisation : contours et HF spatiales
- causes :
  - sous-échantillonnage spatial (*aliasing*)
  - interpolation au travers d'un contour

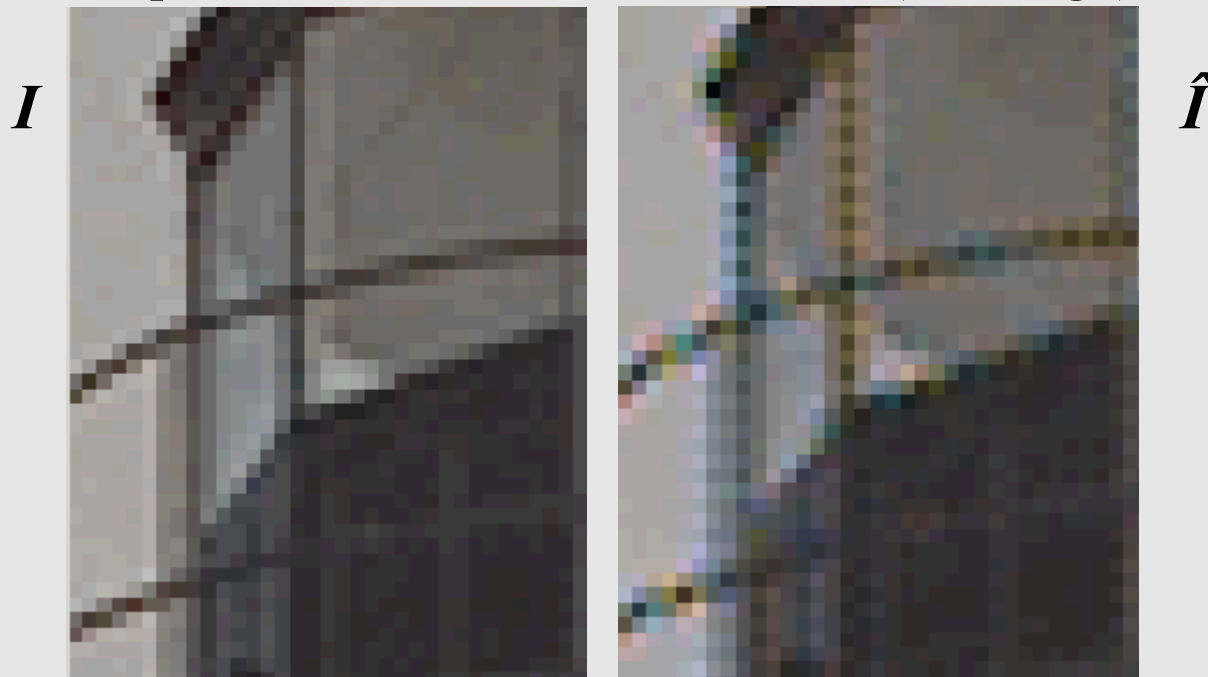


## Artefacts de dématricage (3/3)

### • Artefacts caractéristiques du dématricage (2/2)

#### ➔ Effet de « fermeture éclair » (ang. « *zipper effect* »)

- symptôme : répétition de motifs alternés colorés (*crénelage*), transitions moins nettes



- localisation : contours horizontaux et verticaux
- causes
  - disposition en quinconce des niveaux de  $G$  disponibles dans  $I^{CFA}$
  - interpolation au travers d'un contour horizontal ou vertical

## Principes exploités pour le dématricage (1/3)

### • Corrélation spatiale

- Une image est composée de régions homogènes juxtaposées.
  - Au sein d'une région, tous les pixels ont des niveaux similaires, et ce, pour chaque composante couleur.
  - Zones de transition entre deux régions  $\Leftrightarrow$  forte variation locale des composantes.
- ➔ **Principe : pour estimer les composantes manquantes en un pixel, utiliser seulement des pixels voisins qui appartiennent à la même région.**

$I^{CFA}$

b	b	h	h	h
b	↓	h	h	h
b →	b	← h	h	h
b	↑	h	h	h
b	b →	h	← h	h
b	b	↑	h	h

Interpolation bilinéaire



$I^{CFA}$

b	b	h	h	h
b	↓	h	h	h
b →	b	h	h	h
b	↑	h	h	h
b	b →	h	← h	h
b	b	↑	h	h

Interpolation de niveaux voisins sélectionnés

## Principes exploités pour le dématriage (2/3)

### • Corrélation spectrale

- Dans une image naturelle, les trois composantes couleurs sont fortement corrélées.
- Preuve [GAM02] : les coefficients de corrélation inter-composantes, par exemple

$$r^{R,G} = \frac{\sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} (R_{x,y} - \mu^R)(G_{x,y} - \mu^G)}{\sqrt{\sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} (R_{x,y} - \mu^R)^2} \sqrt{\sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} (G_{x,y} - \mu^G)^2}} \quad \text{avec} \quad \mu^R = \frac{\sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} R_{x,y}}{wh}$$

sont élevés pour toutes les composantes et toutes les sous-bandes fréquentielles.

- Cette corrélation est particulièrement élevée dans les zones de hautes fréquences spatiales.
- ➔ **Principe : prendre en compte cette corrélation spectrale (entre composantes couleur) en un pixel donné pour y estimer les composantes manquantes.**

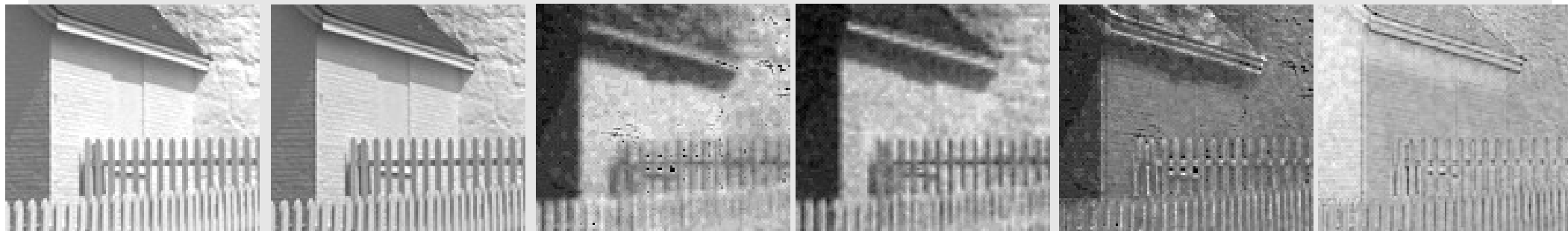


## Principes exploités pour le dématricage (3/3)

- Pour exploiter la corrélation spectrale, on interpole soit

- le *rapport* des composantes couleur,
- la *différence* des composantes couleur.

$I$



$I^R$

$I^G$

$|I^R - I^G|$

$|I^B - I^G|$

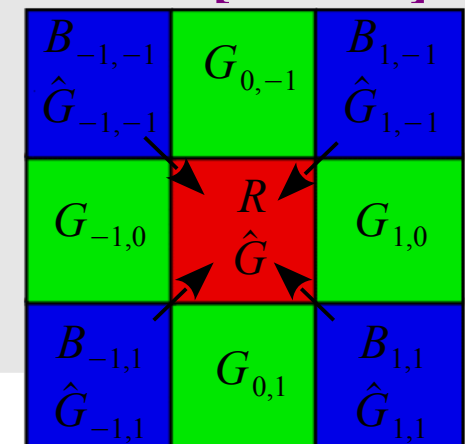
$|I^R / I^G|$

$|I^B / I^G|$

- Exemple : dématricage basé sur la constance de « teinte » [Cok86]

- Estimer  $G$  par interpolation bilinéaire
- Estimer  $R$  et  $B$  par interpolation du *rapport* des composantes couleur, ex. en {GRG}

$$\hat{B} = \hat{G} \cdot \frac{1}{4} \left[ \frac{B_{-1,-1}}{\hat{G}_{-1,-1}} + \frac{B_{1,-1}}{\hat{G}_{1,-1}} + \frac{B_{-1,1}}{\hat{G}_{-1,1}} + \frac{B_{1,1}}{\hat{G}_{1,1}} \right]$$



## Dématriçage exploitant la corrélation spatiale (1/3)

- **Utilisation d'un gradient local pour estimer  $G$** 
  - ➔ But : réaliser l'interpolation le long de la transition et non à travers elle.
  - ➔ Principe : déterminer la direction de la transition locale en calculant une approximation (de la norme) du gradient.
- **Méthode utilisant un développement au 1<sup>er</sup> ordre** [Hibbard95]

Exemple en {GRG}

- 1 **Calcul des « gradients » horizontal  $\Delta^x$  et vertical  $\Delta^y$  :**

$$\Delta^x = |G_{-1,0} - G_{1,0}| ,$$

$$\Delta^y = |G_{0,-1} - G_{0,1}| .$$

- 2 **Interpolation du niveau de vert :**

$$\hat{G} = \begin{cases} (G_{-1,0} + G_{1,0})/2 & \text{si } \Delta^x < \Delta^y, \\ (G_{0,-1} + G_{0,1})/2 & \text{si } \Delta^x > \Delta^y, \\ (G_{0,-1} + G_{-1,0} + G_{1,0} + G_{0,1})/4 & \text{si } \Delta^x = \Delta^y. \end{cases}$$

b	b	h	h	h
b	b	h	h	h
b	b	h	h	h
b	b	h	h	h
b	b	h	h	h

## Dématriçage exploitant la corrélation spatiale (2/3)

- Utilisation d'un développement au 2<sup>ème</sup> ordre [Hamilton&Adams97]

Exemple en {GRG}

- Calcul des gradients horizontal  $\Delta^x$  et vertical  $\Delta^y$  :

$$\Delta^x = |G_{-1,0} - G_{1,0}| + |2R - R_{-2,0} - R_{2,0}|,$$

$$\Delta^y = |G_{0,-1} - G_{0,1}| + |2R - R_{0,-2} - R_{0,2}|.$$

- Interpolation du niveau de vert : hypothèse que R - G est constant

$$\hat{G} = \begin{cases} (G_{-1,0} + G_{1,0})/2 + (2R - R_{-2,0} - R_{2,0})/4 & \text{si } \Delta^x < \Delta^y, \\ (G_{0,-1} + G_{0,1})/2 + (2R - R_{0,-2} - R_{0,2})/4 & \text{si } \Delta^x > \Delta^y, \\ (G_{0,-1} + G_{-1,0} + G_{1,0} + G_{0,1})/4 \\ \quad + (4R - R_{0,-2} - R_{-2,0} - R_{2,0} - R_{0,2})/8 & \text{si } \Delta^x = \Delta^y. \end{cases}$$

$R_{-2,-2}$	$G_{-1,-2}$	$R_{0,-2}$	$G_{1,-2}$	$R_{2,-2}$
$G_{-2,-1}$	$B_{-1,-1}$	$G_{0,-1}$	$B_{1,-1}$	$G_{2,-1}$
$R_{-2,0}$	$G_{-1,0}$	$R_{0,0}$	$G_{1,0}$	$R_{2,0}$
$G_{-2,1}$	$B_{-1,1}$	$G_{0,1}$	$B_{1,1}$	$G_{2,1}$
$R_{-2,2}$	$G_{-1,2}$	$R_{0,2}$	$G_{1,2}$	$R_{2,2}$

### → Problèmes restants

- Mauvais choix de la direction d'interpolation (zones de détails fins).
- Incohérences entre directions d'interpolation pour  $R$  et  $B$ .

# Dématriçage exploitant la corrélation spatiale (3/3)

## Autres méthodes exploitant la corrélation spatiale

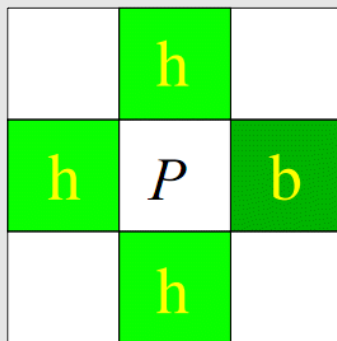
### ➔ Interpolation linéaire à pondération adaptative [Kimmel99]

$$\hat{G} = \frac{w_{0,-1} \cdot G_{0,-1} + w_{-1,0} \cdot G_{-1,0} + w_{1,0} \cdot G_{1,0} + w_{0,1} \cdot G_{0,1}}{w_{0,-1} + w_{-1,0} + w_{1,0} + w_{0,1}}$$

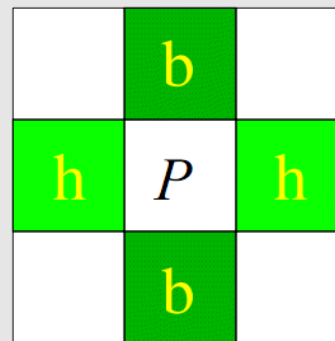
les poids  $w_{\delta x, \delta y}$  étant calculés à partir des gradients directionnels.

### ➔ Reconnaissance de formes [Cok86]

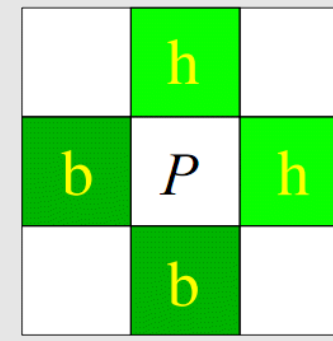
- Classer les niveaux de vert ( $G_1 \geq G_2 \geq G_3 \geq G_4$ ) des voisins 4-connexes en



Contour



Bande



Coin

$b$  si  $G < \bar{G}$   
 $h$  si  $G \geq \bar{G}$

- Estimer le niveau de vert selon la forme du voisinage

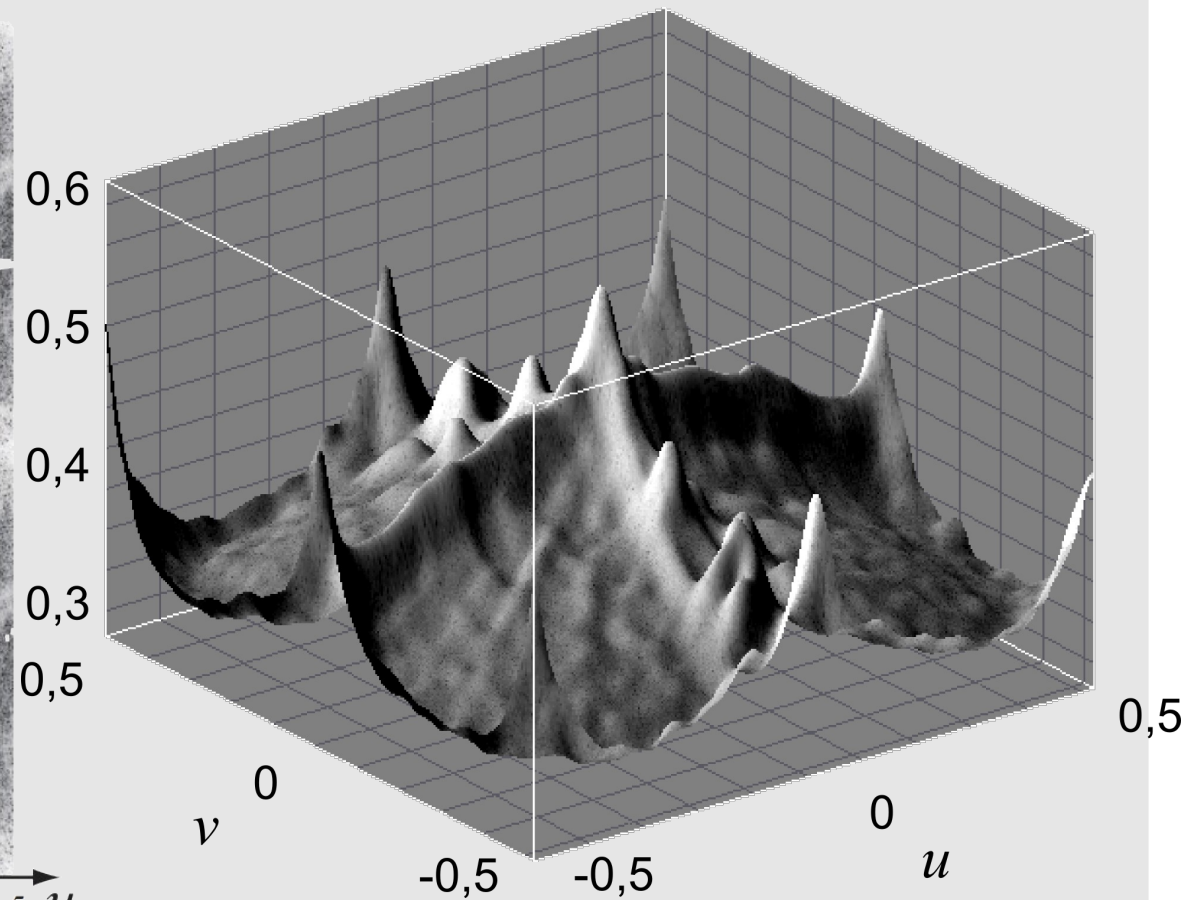
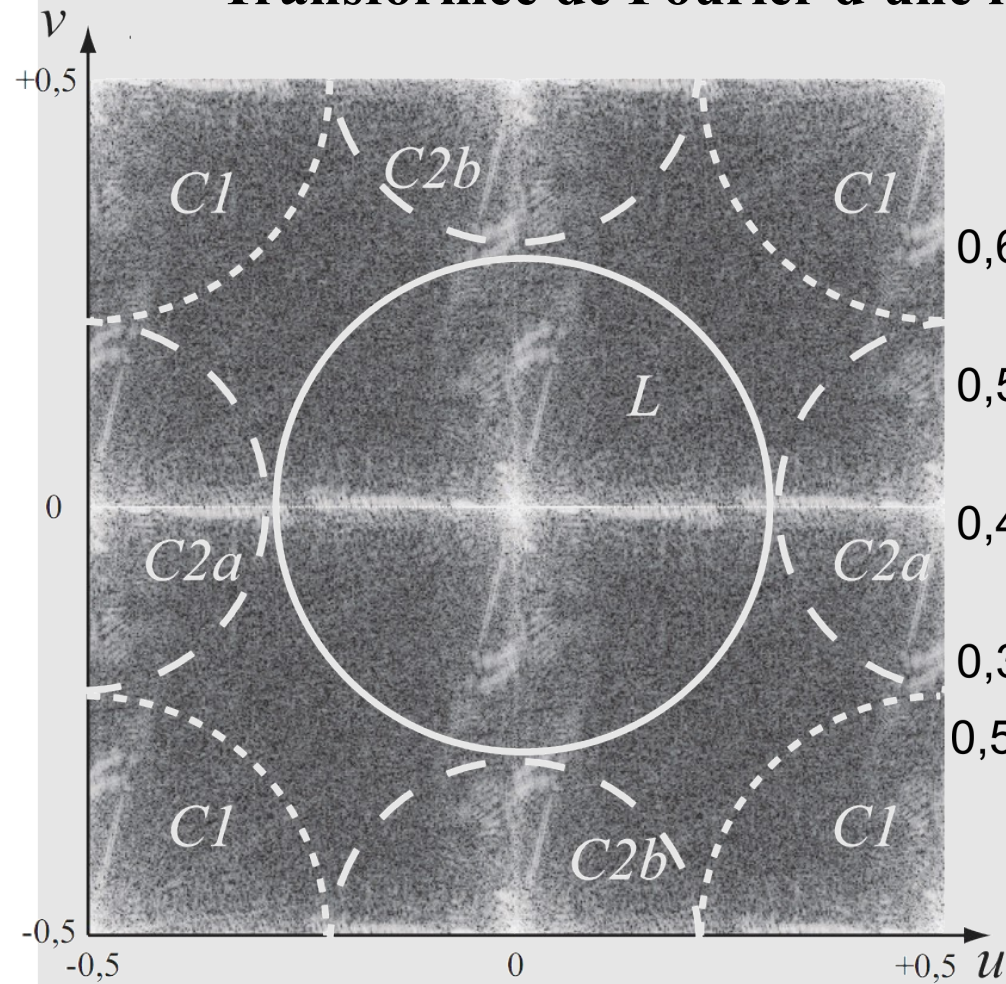
*Exemple* : si on est en présence d'un contour,  $\hat{G} = M = (G_2 + G_3)/2$

# Méthodes fréquentielles de dématriçage (1/3)

## • Dématriçage par sélection de fréquences [Alleysson04]

### → Transformée de Fourier d'une image CFA

C = chrominance  
L = luminance



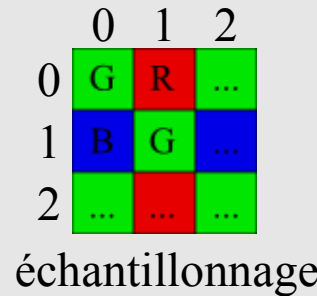


# Méthodes fréquentielles de dématricage (2/3)

## ➔ Transformée de Fourier d'une image CFA (suite)



$$\mathbf{I} \equiv \mathbf{f} \equiv [f^R \ f^G \ f^B]$$



$$m^R = \frac{1}{4} (1 - (-1)^x) (1 + (-1)^y)$$

$$m^G = \frac{1}{2} (1 + (-1)^{x+y})$$

$$m^B = \frac{1}{4} (1 + (-1)^x) (1 - (-1)^y)$$



$$\mathbf{I}^{CFA} \equiv \mathbf{f}^{CFA}$$

$$f^{CFA}(x, y) = \sum_{k=R, G, B} f^k(x, y) m^k(x, y)$$

En posant  $\begin{bmatrix} f^L \\ f^{C1} \\ f^{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/4 & 1/2 & 1/4 \\ -1/4 & 1/2 & -1/4 \\ -1/4 & 0 & 1/4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f^R \\ f^G \\ f^B \end{bmatrix}$ , on a :

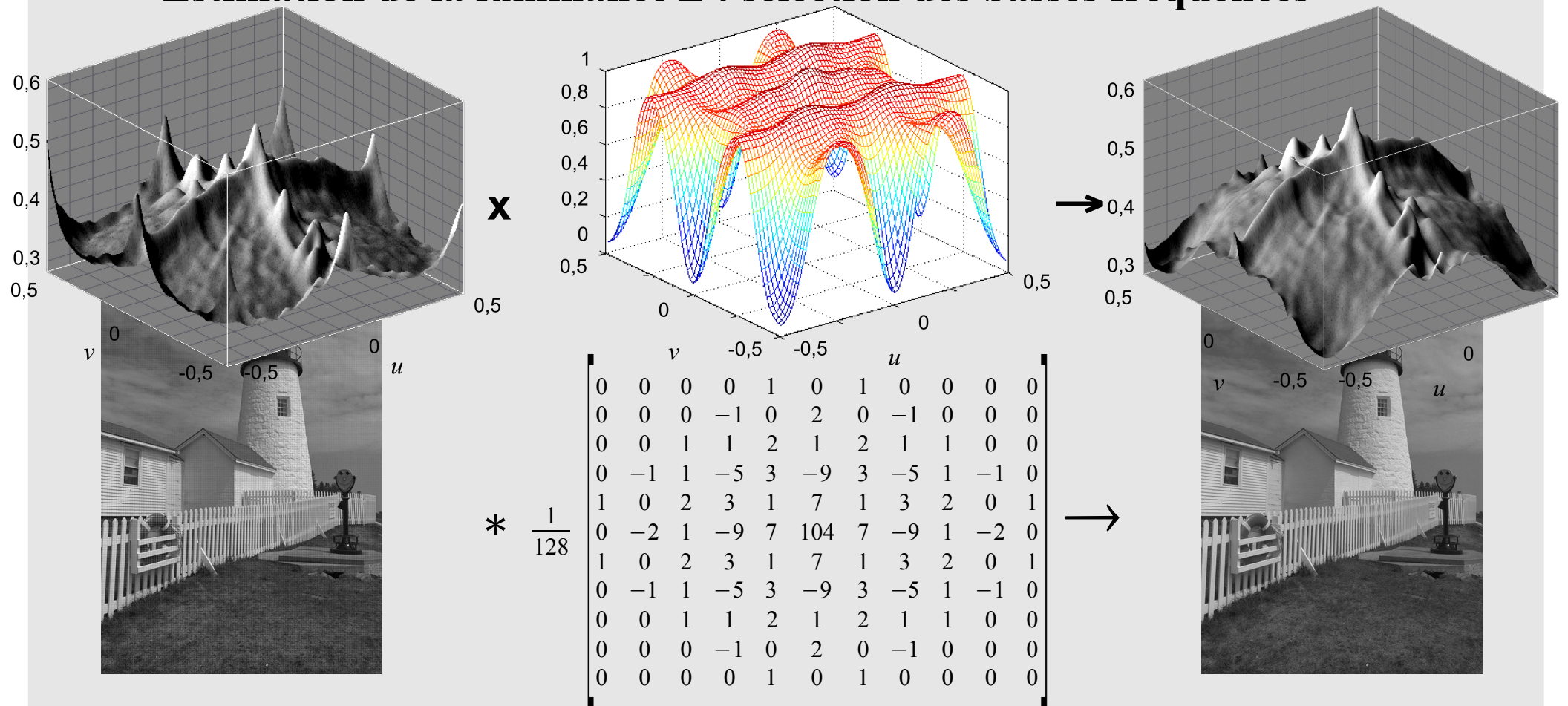
$$F^{CFA}(u, v) = F^L(u, v) + F^{C1}(u-0.5, v-0.5) + \underbrace{F^{C2}(u-0.5, v)}_{F^{C2a}} - \underbrace{F^{C2}(u, v-0.5)}_{F^{C2b}}$$

fréquence normalisé par PI

# Méthodes fréquentielles de dématricage (3/3)

## • Dématricage par sélection de fréquences (*fin*)

→ Estimation de la luminance  $L$  : sélection des basses fréquences



→ Estimation des composantes de chrominance par filtres orthogonaux

# Évaluation de la qualité du dématrissage (1/2)

## • Critères

### ➔ Rapport signal-sur-bruit pic-à-pic (*ang. Peak Signal to Noise Ratio*)

- Aussi utilisé en compression d'images
- Mesure la qualité de l'image estimée  $\hat{I}$  par rapport à l'image de référence  $I$  en évaluant l'erreur quadratique moyenne (*ang. Mean Square Error*) :

$$PSNR(I, \hat{I}) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{d^2}{MSE} \right) \quad \text{avec} \quad MSE = \frac{1}{3wh} \sum_{k=R,G,B} \sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} \left( I_{x,y}^k - \hat{I}_{x,y}^k \right)^2$$

$d$  est la valeur maximale possible du signal (si composantes sur 8 bits,  $d=255$ ).

- Le  $PSNR$  s'exprime en **décibels** (dB).
- Plus sa valeur est élevée, meilleure est l'estimation.
- Mesure la « proximité » entre 2 images, pas la qualité visuelle de l'image estimée.

### ➔ Autres mesures

- Mesure perceptuelle (sans unité) dans l'espace  $L^*a^*b^*$  :

$$\Delta E^{L^*a^*b^*} = \frac{1}{3wh} \sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} \sqrt{\sum_{k=L^*,a^*,b^*} \left( I_{x,y}^k - \hat{I}_{x,y}^k \right)^2}$$



## Évaluation de la qualité du dématricage (2/2)

- Résultats (*exemples*) : images estimées et *PNSR***

bilinéaire  
29,2 dB

const. de teinte  
31,7 dB

rec. formes [Cok86]  
34,7 dB

gradient [H&A97]  
38,4 dB

sél. fréq. [All04]  
41,5 dB



# Sélection de références

## • Sites web

- Deux sites sur la technologie des capteurs couleur mono-CCD.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Bayer\\_filter](http://en.wikipedia.org/wiki/Bayer_filter) et  
[http://www.sciences-co.net/sc\\_image/?portfolio=capteurs-ccd](http://www.sciences-co.net/sc_image/?portfolio=capteurs-ccd)
- Description, implémentation et comparaison des principaux algorithmes.  
<http://scien.stanford.edu/pages/labsite/1999/psych221/projects/99/tingchen/main.htm>
- Compilation (quasi-)exhaustive des approches de démosaïçage existantes.  
<http://www.danielemenon.netsons.org/top/demosaicking-list.php>

## • Articles scientifiques

- [All04] D. Alleysson, *30 ans de démosaïçage*. Traitement du Signal, 21(6) : 561-581, 2004.
- [GAM02] B. K. Gunturk, Y. Altunbasak et R. M. Mersereau, *Color plane interpolation using alternating projections*. IEEE Transactions on Image Processing, 11(9) : 997-1013, 2002.