

ENS Louis-Lumière

La Cité Du Cinéma - 20 rue Ampère BP 12 – 93213 La Plaine Saint-Denis

Tel. 33 (0)1 84 67 00 01

www.ens-louis-lumiere.fr

Mémoire de master

Spécialité cinéma, promotion 2017-2018

Soutenance de décembre 2018

MATRICES DE FILTRES COLORÉS ET DÉMOSAÏQUAGE : UNE APPROCHE DE LA RESTITUTION DU DÉTAIL EN NUMÉRIQUE

Pierre POTONNIER

Ce mémoire est accompagné de la partie pratique intitulée : « *Comparaison et mise en défaut d'ensembles matrices de Bayer – Algorithmes de démosaïquage* ».

Directeur de mémoire: **Paul BYDLOWSKI**

Présidente du jury cinéma et coordinatrice des mémoires: **Giusy PISANO**

Membres du Jury : **Giusy PISANO, Pascal Lagriffoul, Paul BYDLOWSKI**

ENS Louis-Lumière

La Cité Du Cinéma - 20 rue Ampère BP 12 – 93213 La Plaine Saint-Denis
Tel. 33 (0)1 84 67 00 01
www.ens-louis-lumiere.fr

Mémoire de master
Spécialité cinéma, promotion 2017-2018
Soutenance de décembre 2018

MATRICES DE FILTRES COLORÉS ET DÉMOSAÏQUAGE : UNE APPROCHE DE LA RESTITUTION DU DÉTAIL EN NUMÉRIQUE

Pierre POTONNIER

Ce mémoire est accompagné de la partie pratique intitulée : « *Comparaison et mise en défaut d'ensembles matrice de Bayer – Algorithme de démosaïquage* ».

Directeur de mémoire : **Paul BYDLOWSKI**

Présidente du jury cinéma et coordinatrice des mémoires : **Giusy PISANO**

Membre du Jury : **Giusy PISANO, Pascal Lagriffoul, Paul BYDLOWSKI**

1/133

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui de près ou de loin m'ont permis de réaliser ce mémoire et la partie pratique qui l'accompagne.

L'École Nationale Louis Lumière et en particulier :

Paul BYDLOWSKI

Mon directeur de mémoire, pour sa patience, ses conseils et son intérêt porté à mon travail.

Dominique TROCNET et Françoise BARANGER

Pour leur soutien administratif.

Laurent STEHLIN

Pour son soutien, ses conseils et aussi ses désaccords.

Didier NOVE, Jean Michel ST-MORET et Sylvie CARCEDO

Pour l'accès et la réservation du matériel nécessaire à la PPM.

Pascal MARTIN et Alain SARLAT

Pour leurs conseils et le prêt de matériel.

Giusy PISANO

Pour son travail sur la méthodologie.

L'ensemble de la promotion Cinéma 2015-2018 et en particulier :

Alexandra EON

Pour son aide sur la PPM.

La société de location de matériel NEXT SHOT pour son soutien et le prêt de matériel lors de la PPM.

Ainsi que :

Winnie DHENIN, Julien RABIA et Nicolas GALLARDO,

Pour leur patience et leur bonne humeur lors du tournage de la PPM.

RÉSUMÉ

La restitution de la couleur et du détail a toujours été au centre des attentions des acteurs de l'industrie cinématographique. Nous nous proposons dans ce mémoire de faire un tour d'horizon sur le sujet de la restitution du détail (coloré ou non) dans la chaîne de traitements du cinéma numérique.

Plus particulièrement, nous nous intéresserons à la restitution du détail et la reconstruction de l'information colorée au travers du système matrice de filtre coloré – capteur – dématricage.

Nous regarderons du côté de l'histoire des techniques pour comprendre l'origine de deux technologies modernes majeures pour la captation d'image que sont le capteur CMOS et les matrices de Bayer et nous expliquerons les enjeux et les fonctionnements de ces technologies.

Nous regarderons du côté de la recherche pour comprendre, expliquer et évaluer le démosaïquage, étape corollaire à l'utilisation de matrices de filtres colorés telles que celle proposée par Bryce E. Bayer.

Nous mettrons en pratique nos nouvelles connaissances avec l'usage d'algorithmes de démosaïquage. Nous regarderons s'il existe des différences de rendu avec des images fournies par les fabricants. Nous tournerons des essais qui auront pour but d'une part de mettre en défaut les algorithmes proposés par un fabricant de caméra et d'autre part de vérifier si ces algorithmes peuvent avoir une réelle influence sur le rendu final de l'image.

Enfin, nous conclurons s'il convient de prendre en compte ces nouvelles données au moment de tourner.

ABSTRACT

The color and detail restitution were always in the center of attention of the cinematographic industry. We suggest in this thesis to give an overview on the detail restitution (colored or not) in the digital cinema processing chain.

We will focus more specifically on the detail restitution and the reconstruction of colored information through the color filter matrix system - sensor – demosaicing.

We will look at the history of techniques to understand the origin of the CMOS sensor and Bayer matrices technologies CMOS, and we will explain the issues and the operation of these technologies.

We will look at the research side to understand, explain, and evaluate demosaicing, a corollary step of the use of color filter matrices such as proposed by Bryce E. Bayer.

Finally, we will put our new knowledge into practice with the use of demosaicing algorithms. We'll see if there are any differences in rendering with images provided by the manufacturers. We will shoot tests that aim on the one hand to fault the algorithms proposed by a camera manufacturer and on the other hand to check if these algorithms can have a real influence on the final rendering of the image.

Finally, we will conclude whether to take into account these new data when shooting a film.

MOTS CLÉS

Débayerisation, Démosaïquage, Dématriçage, Bayer, Algorithme, Capteur, CMOS, Raw, Couleur, Détail, Définition

KEY WORDS

Debayering, Demosaicing, Bayer, Algorithm, Sensor, CMOS, Raw, Color, Detail, Resolution

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	2
RÉSUMÉ	3
ABSTRACT	4
MOTS CLÉS	5
KEY WORDS	5
SOMMAIRE	6
INTRODUCTION	8
PARTIE I : CAPTEURS CMOS ET MATRICES COLORÉES	12
A) ORIGINE ET FONCTIONNEMENT D'UN CAPTEUR CMOS	13
1) Historique de la captation d'image et des capteurs d'images	13
2) Capteur CMOS	16
B) REPRODUCTION DE LA COULEUR ET MATRICE DE FILTRES COLORÉS	24
1) La couleur sans matrice de filtres	24
2) Systèmes à matrices de filtres colorés	28
C) ÉLÉMENTS LIMITANTS DE LA RESTITUTION DU DÉTAIL	39
1) Ensemble Objectif-Caméra	39
2) Traitement en laboratoire	42
3) Projection et Mise à l'Échelle	43

PARTIE II : ALGORITHMES, DÉFAUTS ET ÉVALUATION DE L'ENSEMBLE	
MATRICE/ALGORITHME	45
A) DÉFAUTS DUS AUX MATRICES DE FILTRES ET LEUR DÉMOSAÏQUAGE	47
1) Notions de définition et de résolution	47
2) Artéfacts et Défauts dus aux Matrices de Filtres et au Démosaïquage	49
B) ALGORITHMES DE DÉMOSAÏQUAGE	55
1) Principes de démosaïquage	55
2) Méthodes de démosaïquage	59
C) ÉVALUATION DES ALGORITHMES	70
1) Méthode d'évaluation et critères	70
2) Évaluation des algorithmes présentés	74
PARTIE III : UTILISATION ET COMPARAISON D'ALGORITHMES DE DÉMOSAÏQUAGE POUR PLUSIEURS CAMERAS	79
A) PANEL DE CAMERAS ET UTILISATION DES LOGICIELS DE DÉMOSAÏQUAGE	80
1) Contexte, choix de caméras et méthodologie	80
2) Exploitation de fichiers RAW sur différents logiciels constructeurs et tiers	82
3) Essais de démosaïquage, résultats et observations	94
B) QUELQUES MOTS SUR LA PARTIE PRATIQUE DE MÉMOIRE	106
1) Le projet	106
2) Extraits et observations	107
CONCLUSION GÉNÉRALE DU MÉMOIRE	113
BIBLIOGRAPHIE, FILMOGRAPHIE ET RÉFÉRENCES	117
DOSSIER DE PARTIE PRATIQUE DE MÉMOIRE	122

INTRODUCTION

Le cinéma numérique est apparu dans les années 2000. Il a proposé une nouvelle façon d'envisager la production et la distribution des films. On a longtemps tenté de comparer le rendu d'image qu'apportent les techniques de tournage en numérique avec ce que l'on connaissait en argentique. Souvent, la comparaison se faisait dans le but d'expliquer que l'on devrait toujours tourner en argentique car la qualité d'image qu'apporte le numérique n'est pas suffisante. Le fait est qu'aujourd'hui, d'une part, la qualité de la chaîne numériques semble équivalente à celle de la pellicule et la production et la diffusion de films en numérique est devenue la norme.

Depuis les débuts du cinéma numérique avec des tournages dans des formats vidéo adaptés rapidement au cinéma, nous sommes arrivés à un workflow qui est devenue une norme : le tournage en RAW. L'utilisation de fichiers numériques non compressés que certains appellent négatif numérique permet de finaliser l'image issue de la caméra a posteriori est aujourd'hui ce qui constitue la base du workflow dans le cinéma.

La recherche et les tentatives de nouveaux systèmes par fabricants sur les capteurs d'image pour la prise de vue est en ébullition constante. Les technologies changent et évoluent, mais aujourd'hui on constate la dominance d'une technologie : le capteur CMOS associé à ce que l'on appelle « un filtre de Bayer ». Cette matrice de filtres apposée sur les capteurs, au même titre que toute autre matrice de filtres, nécessite une étape de reconstruction de l'information couleur que l'on désigne souvent par le néologisme « Débayerisation » issu du terme « Debayering » en anglais. On peut choisir des termes plus adaptés comme dématricage ou démosaïquage que nous utiliserons au long de ce mémoire.

Souvent, le démosaïquage est une étape peu documentée et peu étudiée par les chefs opérateurs. Pourtant, c'est l'équivalent du développement de la pellicule argentique et donc c'est une étape primordiale dans la chaîne de production de l'image d'un film. Pendant le démosaïquage, l'information colorée est construite à partir des données issues

du capteur et détermine deux paramètres importants : la restitution des couleurs captées dans un espace couleur normé de travail et/ou de diffusion indispensable à la chaîne numérique et plus élémentairement, la restitution du détail (qu'il soit coloré ou non) de l'image. Cela se fait à l'aide d'algorithmes proposés par des chercheurs et des ingénieurs.

Ce mémoire a pour but d'étudier l'influence des matrices de filtres colorés de Bayer et de leur démosaïquage uniquement sur la restitution du détail dans l'image numérique.

Ce mémoire a se propose de répondre aux questions suivantes :

- Pourquoi la matrice de Bayer est-elle la plus utilisée et d'où vient-elle ?
- Peut-on parler de matrice de Bayer au singulier ? Y-a-t-il plusieurs matrices de Bayer possibles ?
- Quels sont les problèmes posés par les matrices de filtres colorés dans la restitution du détail dans l'image numérique ?
- Comment les algorithmes de démosaïquage influencent-ils le rendu du détail et comment peuvent-ils minimiser les problèmes créés par les matrices de filtres colorés ?
- Comment évaluer l'efficacité des algorithmes ?
- Les différences de rendus entre différents algorithmes sont-elles significatives ?
- Tout cela doit-il avoir une influence sur notre façon de tourner des images ?

Nous étudierons dans une première partie l'origine des capteurs CMOS et des filtres de Bayer ainsi que leur fonctionnement. Nous évoquerons aussi d'autres éléments qui viennent jouer dans la restitution du détail.

Nous étudierons dans une deuxième partie les algorithmes qui permettent le démosaïquage, à la fois dans leur fonctionnement et leurs défauts. Nous essayerons de proposer un lien avec les considérations qu'un opérateur a déjà à propos d'une caméra et du travail du laboratoire.

Enfin, dans une troisième partie, nous mettrons en œuvre des algorithmes de démosaïquage et nous présenterons le travail de la partie pratique de mémoire, qui consiste à tenter de voir l'influence des matrices de filtres colorés et leur démosaïquage au travers d'essais caméra.

PARTIE I : CAPTEURS CMOS ET MATRICES COLORÉES

A) ORIGINE ET FONCTIONNEMENT D'UN CAPTEUR CMOS

1) Historique de la captation d'image et des capteurs d'images

On parcourra ici succinctement l'histoire de la photographie, du film et des capteurs d'image dans un but de contextualiser l'utilisation contemporaine des capteurs d'images.

Les premières expériences de fixation d'une image sont antérieures, mais nous pouvons voir qu'au début du XIX^{ème} siècle, avec Joseph Nicéphore Niépce essaie de trouver des moyens de fixer une image sur un support de manière définitive. Il expérimente d'abord plusieurs procédés, négatifs ou positifs, avec du nitrate d'argent ou du bitume de Judée. En 1826 il effectue la première photographie permanente sur une plaque d'étain recouverte de bitume de Judée. En 1839, le Daguerréotype est le premier système grand public qui permet la captation d'une image et connaît un grand succès. Ce procédé utilise une plaque de verre recouverte d'argent et fonctionne en positif. Il a l'avantage par rapport au système de Niépce d'avoir des temps d'expositions beaucoup plus courts (quelques minutes contre jusqu'à plusieurs jours). En 1840, William Henry Fox Talbot invente le calotype. C'est un des premiers procédés à utiliser un négatif. Ces trois inventeurs et bien d'autres encore sont à l'origine des procédés photographiques et chacun s'en dira l'inventeur. En 1884, Georges Eastman invente le film en celluloïd souple permettant le stockage de plusieurs images sur une magasin que l'on peut manipuler aisément. Cela permettra l'invention de la première caméra 35 mm par Thomas Edison en 1891 et peu après les premières projections en public par les Frères Lumière en 1895.

Dans le même temps, on cherche à reproduire la couleur. Au départ, on colorait à la main selon différentes techniques les daguerréotypes pour ajouter de la couleur à la photographie noir et blanc. Un peu plus tard, on trouve des systèmes pour teinter la pellicule. À partir des années 1860, les premiers systèmes de prise de vue en couleur

apparaissent. Ils ont pour principe de prendre plusieurs photographies avec des filtres différents pour chaque composante couleur. On utilise 3 filtres : ce sont les débuts de la trichromie. En 1904, les frères Lumière inventent l'autochrome, qui dispose d'une matrice de grains photosensibles teintés de trois couleurs sur une plaque de verre. C'est le premier système couleur qui fonctionne en une seule prise de vue. Après des systèmes de prise de vue sur plusieurs pellicules en simultané (Technicolor Bichrome et Trichrome), en 1935, Kodak présente le kodachrome qui permet de faire des prises de vue en couleur avec un principe de couches sur le film. C'est un système positif réservé au 16mm et aux amateurs. S'en suivent l'Agfacolor et ses « clones » (Kodacolor, Fujicolor...) qui fonctionnent en négatif et enfin l'Eastmancolor en 1950, qui marque la base de la pellicule couleur moderne. La pellicule ne cessera d'évoluer ensuite jusqu'à aujourd'hui.

Les expérimentations depuis la fin des années 1910 et l'arrivée de la télévision dans les années 1930 fait émerger un autre procédé, totalement différent de la pellicule puisque qu'électronique, les tubes à vide. Ce système permettait la création d'une image électronique reproductible par un téléviseur, utilisant lui aussi le principe de tube à vide. C'est le début de l'image vidéo. Pour stocker ces images, on utilisera des systèmes de bandes magnétiques vidéo. L'image est encore analogique.

L'invention du transistor en 1947 dans les laboratoires Bell et son développement permettent la recherche sur d'autres moyens de capter une image vidéo. Dans les années 1960, les laboratoires Bell proposent un capteur d'image CBD (Charge Bubble Device), dans le même temps les laboratoires de Philips proposent un système similaire, le capteur BBD (Bucket Brigade Device). Ce sont les origines du capteur CCD pour lequel Michael Francis Tompsett pose le brevet¹ en 1978, une technologie encore utilisée à ce jour : des

¹ M.F. Tompsett, "Charge Transfer Imaging Device" U.S. Patent 4,085,456, Avril 1978.

photosites (sorte de puits) dans un substrat de silicium qui convertissent proportionnellement en théorie les photons en charges électriques. Dans les années 1990, le Dr Eric Fossum développe la technologie CMOS pour la NASA au California Institute of Technology. Cette technologie a pour avantages de permettre des coûts plus faibles et une meilleure compacité par l'intégration des composants nécessaires au fonctionnement du capteur et des circuits de traitement d'image au sein de la même puce, chose que la technologie CCD ne peut pas proposer. Dans le même temps, on voit arriver les débuts de la photographie puis de la vidéo numérique, chose que permettent aisément les capteurs CCD et CMOS.

Pour reproduire la couleur avec des capteurs CCD et CMOS en vidéo, nous sommes passés par des étapes similaires à celles du cinéma argentique. Dans les premiers temps il y a eu des systèmes à codage coloré temporel, avec une roue comportant des filtres qui tournent à une vitesse définie devant le capteur par exemple. On a ensuite proposé d'utiliser plusieurs capteurs que l'on exposera avec une seule composante couleur : ce sont les systèmes d'abord Tri-CCD et plus tard Tri-CMOS qui fonctionnent grâce à un prisme séparateur (un peu comme le principe du technicolor 2 Strip et 3 Strip). Le système le plus courant est l'utilisation d'une matrice de filtres colorés ou CFA (Color Filter Array) qui permet de dédier chaque pixel à une des composantes couleur choisies. Ce système nécessite une interpolation pour retrouver des informations de couleur en chaque pixel du capteur appelée démosaïquage, qui sera effectuée grâce à des calculs plus ou moins complexes, que ce soit dans la caméra, ou plus tard au laboratoire numérique. Le motif le plus connu est celui proposé par Bryce E. Bayer en 1976² et il est utilisé dans presque toutes les caméras de cinéma numérique actuelles.

² B.E. Bayer "Color Imaging Array" U.S. Patent 3,971,065, Juillet 1976

2) Capteur CMOS

La technologie CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) utilise les mêmes techniques de fabrication que dans le domaine de l'informatique pour d'autres composants tels que les processeurs ou la mémoire Flash. Elle s'est donc considérablement développée. Vers la fin des années 90, les capteurs CMOS ont commencé à intégrer des systèmes jusqu'alors réservés aux capteurs CCD, tels que l'utilisation de microlentilles au niveau des photosites, ce qui a permis d'envisager l'utilisation de CMOS pour des systèmes de prise de vue de haute qualité.

Aujourd'hui, la technologie CMOS est présente dans les appareils photos numériques DSLR (Digital Single Lens Reflex) et Mirrorless et pratiquement dans toutes les caméras numériques de cinéma. Les capteurs CCD sont encore utilisés en prise de vue, mais il est à noter que toutes les caméras haut de gamme intègrent un système à capteur CMOS. Dans les systèmes où le besoin de qualité est moindre (appareils photos bas de gamme, téléphones portables) le CMOS permet également une simplification et un abaissement du coût grâce à l'intégration des circuits de traitement et de contrôle dans la puce.

Les avantages de la technologie CMOS comparé à la technologie CCD qu'elle a pour vocation de remplacer sont les suivants :

- Facilité de fabrication : la technologie CMOS partage ses techniques de fabrication avec d'autres composants produits à très grande échelle, tandis que la technologie CCD demande des techniques spécifiques.

- Facilité d'adressage : un capteur CMOS fait appel à un adressage X-Y bien plus flexible qui permet de lire des pixels spécifiques du capteur et non le capteur en entier. Cela peut augmenter la vitesse de lecture du capteur et baisser la consommation.
- Faible consommation comparée au CCD : Un capteur CMOS fonctionne avec une tension d'alimentation plus faible qu'un capteur CCD.
- Fonctions embarquées comme le circuit de contrôle, d'amplification et de traitement.

En outre, ses performances et ses faibles coûts comparés à la technologie CCD ont permis son développement et son intégration dans tous les types d'appareils de prise de vue : téléphones portables, caméras numériques, appareils photo, satellites de prise de vue, microcapteurs pour la médecine...

2.1) Architecture d'un capteur CMOS

L'architecture globale peut être qualifiée en fonction de son interface de sortie. Elle peut être analogique, numérique, ou traitée par un SOC (System On a Chip) ou système sur puce (Figure 1.1).

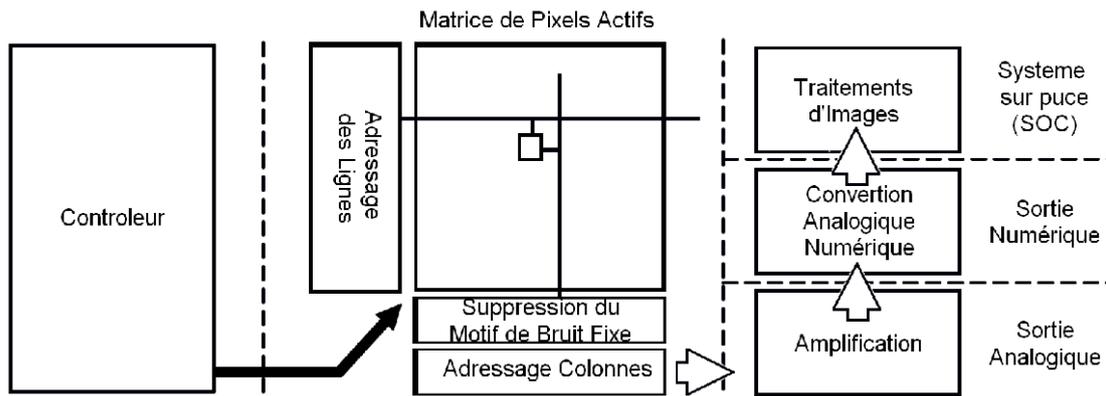


Figure 1.1 Configuration D'un Capteur CMOS

Le contrôleur contient les fonctions de génération d'horloge, de tension d'alimentation et des timings, il est très souvent intégré au capteur. La matrice de pixels actifs comporte les photodiodes et un circuit d'amplification dans chaque pixel et la structure nécessaire à l'adressage des pixels. Le signal peut ensuite aller vers un amplificateur, un circuit de conversion analogique/numérique et dans un circuit de traitement d'image. Ces trois dernières étapes peuvent se faire sur la puce même du capteur ou être traités dans un système différent (à chacune des trois étapes).

2.2) Pixel actif

Un capteur CMOS est un circuit qui peut contenir des photodiodes, des circuits de remise à zéro de photodiode, un circuit d'amplification et un circuit de sortie. Un pixel actif est un pixel qui comporte un circuit d'amplification (figure 1.2). La plupart des capteurs

CMOS utilisent des pixels actifs³ mais il est aussi possible d'intégrer des pixels passifs. L'intérêt serait d'augmenter la taille des photodiodes pour être plus sensibles à la lumière mais le transport des charges serait plus sensible à l'apparition de bruit entre la sortie du pixel et l'amplificateur⁴. Cet inconvénient est démultiplié avec la taille du capteur et le nombre de pixels. C'est pourquoi dans la majorité des applications, on utilise des capteurs CMOS à pixel actif. Il existe plusieurs types de pixels actifs. Nous pouvons notamment évoquer les pixels à photodiodes PN qui ont beaucoup été utilisés dans les premières générations de capteurs CMOS, les systèmes LBCAST (Lateral Buried Charge Accumulator and Sensing Transistor) ou les systèmes à intégration verticale⁵.

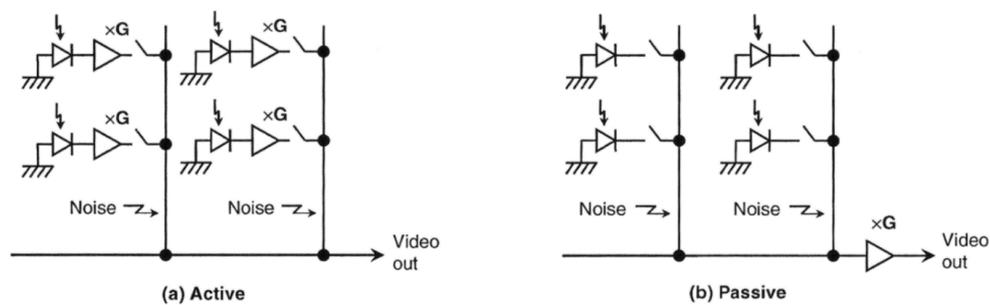


Figure 1.2 Principes de Pixels actifs (a) et passifs (b)⁶

³ Micron, "The Evolution of Digital Imaging: From CCD to CMOS" [en ligne]

http://web.pdx.edu/~larosaa/Applied_Optics_464-564/Projects_Presented/Projects-2008/CCD_and_CMOS/From_CCD_to_CMOS_Tutorial_from_Miron_Inc.pdf

⁴ E.R Fossum "Active Pixel Sensor : Are CCDs dinosaurs ?" *Proc. SPIE, 1900, Charge Coupled Devices and Solid-State Optical Sensors III, 2-14, 1993*

⁵ NAKAMURA Junichi et al, *Image sensor and digital processing for digital still camera*, Boca Raton, Taylor & Francis, 2006, p153-161

⁶ NAKAMURA Junichi et al, *Image sensor and digital processing for digital still camera*, Boca Raton, Taylor & Francis, 2006, p146

2.3) Adressage, Lecture, Interface

L'adressage des pixels se fait par Raster Scanning, ou balayage par trame. Le scanner de ligne envoie un signal de sélection de ligne et un signal de remise à zéro des pixels une fois dans la durée d'une image et le scanner de colonne lit les pixels à chacune de ces périodes.

Différentes techniques pour lire les pixels et traiter le signal sont possibles. On peut distinguer trois familles : les architectures à lecture de pixel en série, les architectures à lecture en colonnes parallèles ou les architectures à lecture globale de pixels (figure 1.3).

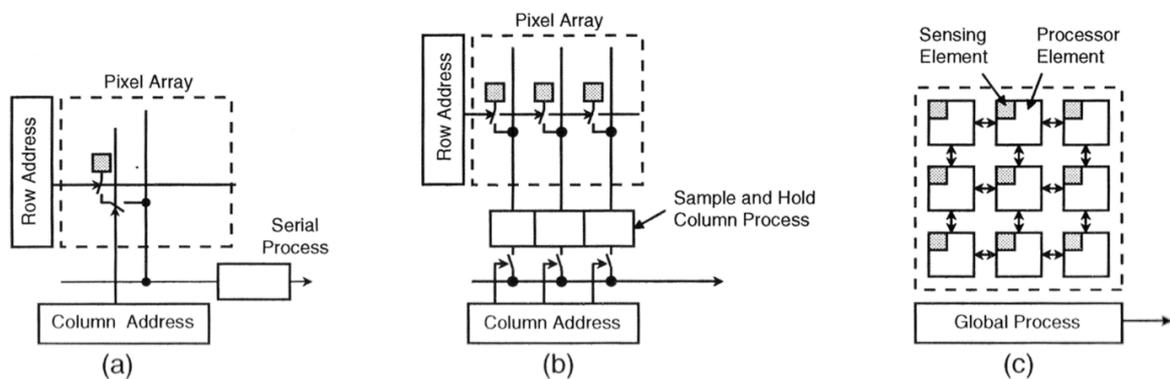


Figure 1.3 Principes de lecture de pixels en série (a), en colonne (b), global (c)⁷

- Le système à lecture de pixel en série choisit ses pixels à lire un par un par adressage X-Y et le traitement s'effectue en série pixel par pixel ensuite.

⁷ NAKAMURA Junichi et al, *Image sensor and digital processing for digital still camera*, Boca Raton, Taylor & Francis, 2006, p150

- L'architecture à lecture en colonnes parallèles est la plus populaire. Les pixels d'une ligne sont lus simultanément, puis le traitement est fait en parallèle pour chaque colonne, ligne par ligne. Ce système permet des pixels comportant moins d'éléments et donc un facteur de remplissage plus élevé et des pixels plus petits pour la même surface sensible. La lecture ligne par ligne permet une fréquence de fonctionnement plus faible (moins d'éléments à lire les uns après les autres).
- La structure à lecture de pixel en parallèle (lecture globale), est utilisée pour des applications particulières, comme la prise de vue à très haute vitesse. Dans chaque pixel est intégré un système de traitement de la charge et cela implique de gros pixels et un faible facteur de remplissage. Cependant, cela permet d'éviter d'avoir un système de traitement ralenti par des lectures en série notamment⁸.

2.4) Bruit et autres défauts

Les capteurs CMOS sont soumis à plusieurs types de bruit. Il convient de les traiter le plus tôt possible dans la chaîne du signal pour les réduire de manière efficace.

Comme le signal est amplifié au sein de chaque pixel, il peut y avoir des variations d'amplification d'un pixel à l'autre, il peut contribuer à ce que l'on appelle le motif de bruit fixe par pixel (Pixel Fixed Pattern Noise ou FPN). Il faut intégrer un circuit de suppression de motif de bruit fixe dans le pixel. Cela se fait de la manière suivante : le signal du pixel exposé est stocké dans une mémoire, puis le pixel est remis à zéro, le signal du pixel non exposé est relu et ne contient alors que le bruit fixe du pixel. Il suffit de soustraire la valeur

⁸ NAKAMURA Junichi et al, *Image sensor and digital processing for digital still camera*, Boca Raton, Taylor & Francis, 2006, p151

du pixel remis à zéro à la valeur du signal gardé en mémoire pour supprimer l'effet du motif de bruit fixe. Plusieurs systèmes permettent de traiter le motif de bruit fixe tel que le CDS (Column Correlated Double Sampling ou double échantillonnage à corrélation) et le DDS (Differential Delta Sampling ou échantillonnage différentiel)⁹. D'autres sources de FPN au niveau du pixel peuvent être : des variations spatiales dans le courant d'obscurité, la sensibilité de la photodiode...

Des caméras modernes permettent de réduire le FPN du pixel en faisant ce que l'on appelle une « Balance des noirs » : la caméra doit enregistrer des images complètement noires pour faire une moyenne des valeurs de FPN de chaque pixel sur plusieurs images consécutives et ensuite utiliser ces données pour réduire le motif de bruit fixe par la suite.

Nous pouvons différencier le FPN par pixel du bruit temporel aléatoire par pixel (Pixel to Pixel Temporal Random Noise) qui lui est influencé par le bruit de remise à zéro de la photodiode, le bruit issu du circuit de traitement, le courant d'obscurité, le bruit de photon et les bruits de grenaille...

Dans une certaine mesure, le bruit aléatoire temporel est moins important que le FPN dans le cas d'images destinées au cinéma, car le spectateur est plus tolérant à sa nature aléatoire. Le grain de pellicule était déjà aléatoire et est accepté depuis plus d'un siècle comme une caractéristique intrinsèque de l'image cinématographique. Le bruit le plus critique à traiter est le bruit fixe car il ne varie pas comme le bruit temporel.

Les bruits de colonnes et de lignes sont les plus critiques. Ces bruits en forme de bandes peuvent être générés dans les capteurs à lecture en colonnes parallèles. Du bruit de colonne peut être généré par des variations de performance dans la zone de traitement

⁹ NAKAMURA Junichi et al, *Image sensor and digital processing for digital still camera*, Boca Raton, Taylor & Francis, 2006, p162-163

des colonnes. Aussi, des injections globales de bruit peuvent arriver au moment de la lecture en parallèle d'une ligne de pixel, créant un bruit de ligne. Ce genre de bruit peut être généré par une fluctuation de la tension d'alimentation dans le système de lecture en parallèle par colonne.

On peut se rendre compte de la différence de l'influence des différents types de bruits sur l'image (figure 1.4). Les bruits en forme de ligne ou colonne et le motif de bruit fixe sont les plus gênants lors de la vision de l'image, suivis par le bruit aléatoire et temporel. Les fabricants doivent réduire au maximum les différents bruits possibles pour atteindre une qualité d'image maximale.

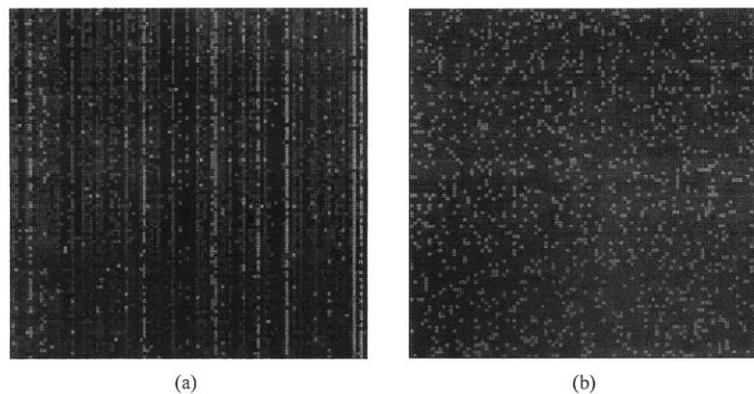


Figure 1.4 Image provenant d'un capteur avant (a) et après (b) suppression du bruit de colonne.

B) REPRODUCTION DE LA COULEUR ET MATRICE DE FILTRES COLORÉS

1) La couleur sans matrice de filtres

1.1) Retour sur la captation en couleur argentique

Le film négatif utilise une structure en couche. Sur le support en acétate ou polyester sont déposées des couches de produits chimiques pour réagir aux différentes longueurs d'onde. Ces produits réagissent à la lumière et forment une image latente. On va ensuite en laboratoire révéler et stabiliser l'image. Le film a gardé les images que l'on a projeté dessus dans la caméra pour pouvoir travailler : copies intermédiaires et positives, montage, étalonnage, numérisation...

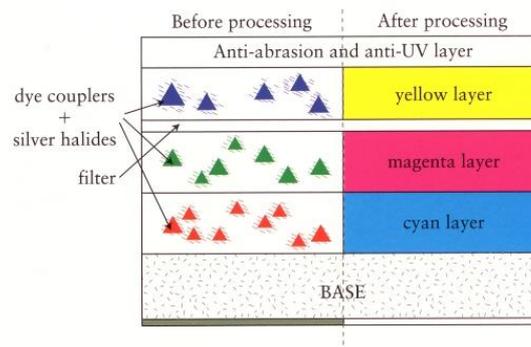


Figure 1.5 Structure d'un négatif couleur avec à gauche la couleur perçue par la couche et à droite la couleur de la couche du négatif une fois exposé¹⁰

¹⁰ [En ligne] http://www.slq.qld.gov.au/resources/preserving-collections/preservation_guides/motion-picture-film

Chaque couche est conçue pour réagir à différentes radiations de longueur d'onde donnée et certaines couches servent de protection à des longueurs d'onde (figure 1.5). En partant de la couche supérieure on a : une couche de protection, une couche filtrant la lumière ultraviolette, une couche sensible au bleu grâce à des coupleurs jaunes, une couche de couleur jaune filtrant la lumière bleue, une couche sensible à la lumière verte grâce à des coupleurs magenta, une couche sensible au rouge grâce à des coupleurs cyan, le support et la couche dorsale qui est faite pour éviter les réflexions de lumière. Les grains d'halogénures d'argent qui réagissent avec la lumière sont répartis de manière aléatoire sur la surface du film et en chaque point de l'image on a des informations dans le rouge, le bleu et vert. Comme le film est un négatif, l'image est complémentaire de celle du sujet : pour un sujet comportant du bleu, l'image formée dans la pellicule est jaune, pour un sujet rouge l'image est cyan et pour un sujet vert l'image est magenta. Pour retrouver une image positive, il faudra projeter ce film sur un autre à la constitution similaire (couche Rouge Vert Bleu avec coupleurs Cyan Magenta et Jaune). En chaque point de l'image, on retrouvera une information de Rouge, de Vert et de Bleu.

1.2) Systèmes couleur à prisme séparateur

La solution que l'on a pu trouver avec les capteurs CCD était d'utiliser trois capteurs différents, un pour chaque composante couleur de l'image. Cela est possible grâce à la disposition d'un prisme séparateur de faisceau déviant la lumière sur les trois capteurs avec des filtres dichroïques (figure 1.6). La lumière qui provient de l'objectif passe au travers d'un premier filtre dichroïque (A) qui réfléchit la lumière bleue vers une surface réfléchissante (C) puis un capteur (celui de la voie bleue) et laisse passer les autres couleurs. La lumière qui n'est pas déviée est donc jaune et continue vers un autre filtre dichroïque (B) qui dévie les rayons lumineux rouges vers un autre miroir (D) et un autre

25/133

capteur (voie rouge). Les rayons lumineux qui ne sont pas déviés vont vers un troisième capteur (voie verte). Cette technique à trois capteurs et prisme séparateur peut être utilisée indifféremment avec des capteurs CCD ou des capteurs CMOS.

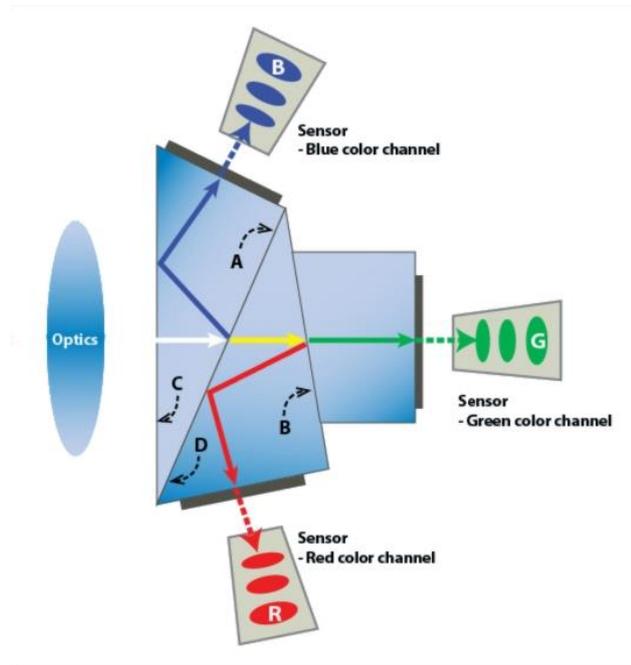


Figure 1.6 Principe d'un système à trois capteurs et prisme séparateur¹¹

Ce procédé permet d'avoir un échantillon de couleur pour chaque pixel final de l'image. Cela permet d'obtenir une qualité d'image optimale. D'abord utilisé pour les images vidéos, les systèmes tri-CCD furent utilisés au début du cinéma numérique avec des caméras telles que la Sony HDC-F750 (probablement)¹² utilisée dans les premiers plans tournés en numérique au cinéma dans le film Star Wars Episode I : La Menace Fantôme de

¹¹ [En ligne] <http://www.jai.com/en/products/colorlinescantech>

¹² « Star Wars Episode II: Exploring a New Universe », *The American cinematographer*, ASC, Septembre 2002, [en ligne] <https://theasc.com/magazine/starwars/index.html>

Georges Lucas photographié par David Tattersall en 1999, la Sony HDW-F900 pour le premier film tourné entièrement en numérique, Vidocq, de Pitof photographié par Jean-Pierre Sauvare et Jean-Claude Thibaut en 2001 ou encore la Thomsom Viper FilmStream utilisée sur Collateral de Micheal Mann photographié par Don Beebe et Paul Cameron en 2004¹³.

Ces systèmes comportent des caractéristiques contraignantes pour le cinéma. La surface des capteurs était plus petite que celle de la fenêtre d'une caméra 35 mm : le format de capteur appelé 2/3' de ces caméras est hérité des standards utilisés en télévision et a des dimensions de 8,8x6,6 mm contre 10,26x7,49 mm en 16 mm standard ou 24,89x18,66 mm en super 35 mm. L'utilisation de montures dédiées habituellement à la vidéo comme la monture Sony Bayonet ou B4 peuvent empêcher d'utiliser les optiques cinémas existantes¹⁴ en montures Arri PL ou Panavision. Les fabricants d'optiques destinées au cinéma ont dû proposer de nouvelles séries d'objectifs pour ces systèmes tels que la série Digiprime de Zeiss ou encore la série Panavision Primo Digital¹⁵. Il faudra d'autres procédés pour conquérir le cinéma.

1.3) Autres systèmes sans filtres colorés

Un autre type de capteur arrivé plus récemment, développé en premier par la société Foveon et suivi par d'autres sociétés comme Sony (voir différents dépôts de

¹³ « Collateral: Hell on Wheels», *The American cinematographer*, ASC, Aout 2004, [en ligne]
<https://theasc.com/magazine/aug04/collateral/page1.html>

¹⁴ Le tirage mécanique d'une monture B4 est de 65,03 mm contre 52 mm pour une monture PL ou 57,15 mm pour une monture Panavision.

¹⁵ Panavision, Primo Digital Lenses,[en ligne]
<https://www.panavision.com/products/primo-digital®-lenses>

brevets^{16 17}), propose de suivre le principe de superposition de couches comme en argentique. C'est le capteur Foveon X3. On peut lire dans le brevet du capteur Foveon par Richard B. Merrill « Cette invention utilise la séparation des couleurs dans une matrice CMOS en utilisant un pixel triple puits. Elle tire parti de la différence de profondeur d'absorption de la lumière dans le silicium en fonction de sa longueur d'onde. Cela permet de mesurer au même endroit différentes couleurs. »¹⁸

Plus la longueur d'onde de la lumière est élevée, plus elle pénètre profondément dans le silicium. Si l'on conçoit un pixel à puits superposés à différentes profondeurs, il est possible donc de détecter la lumière entrante en fonction de sa longueur d'onde et donc retrouver des échantillons de couleur rouge vert et bleu en un seul point du capteur, comme sur un film négatif 35 mm. Ce système permet une meilleure captation du détail (coloré ou non) mais est encore trop récent pour une utilisation généralisée. En outre des problèmes de bruit dans les hautes sensibilités le rend encore trop peu intéressant comparé à un capteur CMOS classique.

2) Systèmes à matrices de filtres colorés

La méthode la plus économique et la plus répandue aujourd'hui consiste à couvrir le capteur d'une matrice de filtres colorés pour obtenir une information de couleur pour

¹⁶ R. B. Merill, « Color separation in an active pixel cell imaging array using a triple-well structure" U.S. Patent 5,965,875, Octobre 1999.

¹⁷ T. Watanabe et Al, « Solid-state imaging device, drive method thereof and electronic apparatus" U.S. Patent 8,614,759, Décembre 2013.

¹⁸ R. B. Merill, « Color separation in an active pixel cell imaging array using a triple-well structure" U.S. Patent 5,965,875, Octobre 1999 p. 10 *"The present invention is directed to color separation in an active pixel MOS imaging array utilizing a triple-well pixel cell structure to take advantage of the differences in absorption length in silicon of light of different wavelengths to measure different colors in the same location"*.

chaque canal. Ces systèmes supposent également une étape de démosaïquage : on va interpoler les informations couleurs pour chaque canal Rouge Vert ou Bleu avec plus ou moins de complexité, puisque contrairement à la pellicule, aux systèmes tri-capteurs et au foveon, l'information est sous-échantillonnée spatialement. Pour la matrice, Il faut faire des choix sur deux critères importants : le choix de filtres utilisés et le type de matrice.

2.1) Qualité des filtres

Le type de filtre utilisé est important car il détermine une sélection des longueurs d'onde accessibles par un photosite du capteur, c'est en quelque sorte un sous-échantillonnage chromatique de la lumière. On peut utiliser différentes couleurs, mais les filtres rouges, verts et bleus semblent permettre la meilleure restitution de couleur avec un meilleur rapport signal/bruit¹⁹. Idéalement, les filtres doivent transmettre la lumière dans la plage de longueur d'onde qui correspond à leur canal. La figure 1.7 illustre un exemple de la transmittance de filtres rouges, verts et bleus sur un capteur. On doit considérer à la fois la hauteur du pic de sensibilité de chaque filtre, la largeur et la répartition de la sensibilité au sein du spectre lumineux et enfin les zones de chevauchement des courbes. L'aire sous la courbe définit la transmittance du filtre, qui doit être le plus élevé possible afin d'avoir un capteur efficace. La largeur des spectres des filtres, leurs formes et les zones de chevauchements vont déterminer en partie la capacité du capteur à discerner les différentes couleurs faisant partie du spectre global que reçoit le capteur. On constate sur cette illustration que le spectre capté par la caméra semble plus large que le spectre visible par l'homme. Cela est en général corrigé par l'ajout d'un

¹⁹ NAKAMURA Junichi et al, *Image sensor and digital processing for digital still camera*, Boca Raton, Taylor & Francis, 2006, p63.

filtre qui coupe à la fois les infrarouges et les ultraviolets. Il faut noter que le silicium lui-même a une transmittance spectrale et une absorption qui lui sont propres.

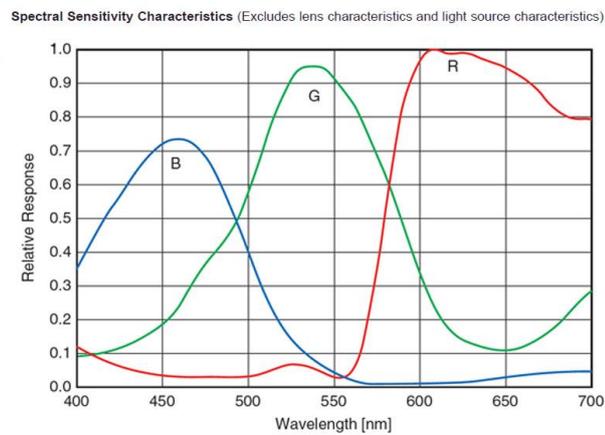


Figure 1.7 Sensibilité spectrale issue de filtres de la caméra Bitran BU57²⁰
(issue de la documentation du fabricant)

La littérature est plus abondante sur l'emploi et la qualité de différentes matrices et sur les méthodes d'interpolation et de démosaïquage. Pourtant les caractéristiques des filtres employés, leur réglage fin, est aussi déterminant dans la qualité de la restitution de l'image. Une étude²¹ proposée par M. Parmar et S.J. Reeves démontre l'importance de la qualité des filtres employés à la fois dans leur capacité à retranscrire le spectre visible mais aussi dans la restitution du détail coloré et ce sur différents modèles de matrices colorées.

Une grande partie de la recherche sur le démosaïquage fonctionne à l'aide de modèles qui simulent un CFA en sous-échantillonnant une image RVB (un échantillon par canal par pixel). Cette manière de procéder néglige les effets de la sensibilité spectrale

²⁰ Bitran, Cooled CCD camera, [en ligne] <https://www.bitran.co.jp/ccd/english/bu50.html>

²¹ M. Parmar et S.J. Reeves, *Selection of Optimal Spectral Sensitivity Functions for Color Filter Arrays*, IEEE Transactions on Image Processing, Vol 19, N°12, Décembre 2010.

qu'ont les filtres colorés sur la reproduction des couleurs. D'autre part, les travaux existants sur la sensibilité spectrale et sa sélection pour améliorer la reproduction des couleurs sont effectués à propos de systèmes qui échantillonnent plusieurs couleurs en un même point de l'espace et seulement d'un point de vue colorimétrique.

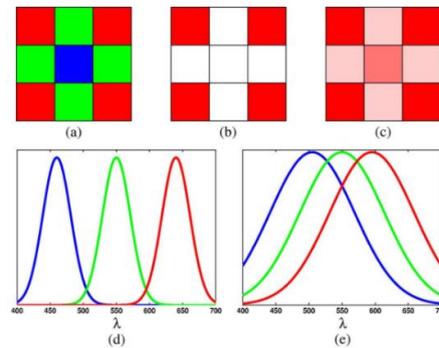


Figure 1.8 (a) Portion d'un CFA ; (b) le canal rouge dans le cas où les sensibilités spectrales RVB ne se superposent pas ; (c) le canal rouge dans le cas où les sensibilités spectrales RVB se superposent ; (d) sensibilités spectrales RVB ne se superposant pas ; (e) sensibilités spectrales RVB se superposant²²

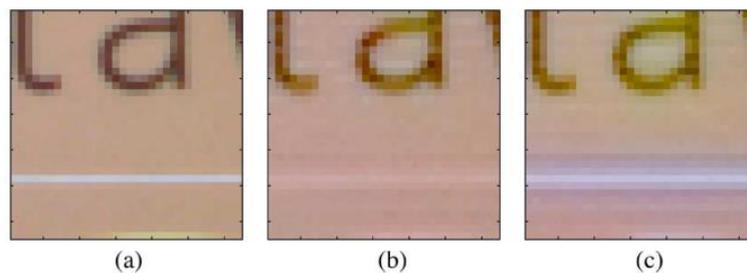


Figure 1.9 (a) Portion d'une image issue d'une mesure multispectrale ; (b) Image reconstruite à l'aide d'un CFA aux sensibilités de la figure 1.8(d) ; (c) Image reconstruite à l'aide d'un CFA aux sensibilités de la figure 1.8(e)²³.

²² M. Parmar et S.J. Reeves, *Selection of Optimal Spectral Sensitivity Functions for Color Filter Arrays*, IEEE Transactions on Image Processing, Vol 19, N°12, Décembre 2010, p 3192.

²³ M. Parmar et S.J. Reeves, *Selection of Optimal Spectral Sensitivity Functions for Color Filter Arrays*, IEEE Transactions on Image Processing, Vol 19, N°12, Décembre 2010, p 3194.

M. Parmar et S.J. Reeves montrent l'importance de leur approche avec la figure 1.8. Nous sommes dans une portion de 3x3 pixels d'une image RVB provenant d'un capteur avec filtre de Bayer centrée sur un pixel bleu (a). Si nous sommes dans le cas où les informations de chaque canal ne se recoupent pas du tout (d), le calcul des valeurs de rouge manquantes sera limité à lisser les valeurs contenues à l'intérieur du canal rouge et les informations des autres canaux ne peuvent être utilisées pour l'interpolation (b). Si les sensibilités spectrales RVB se superposent (e), il y a une corrélation plus forte entre les intensités des trois canaux en un point donné. Dans (c) l'information manquante est colorée en différents niveaux de rouge pour montrer que l'information du niveau de rouge peut être retrouvée dans les pixels des autres canaux vert et bleu. Ce compromis aide à la restitution du détail mais réduit la qualité de la reproduction des couleurs.

On peut voir un exemple de ces deux modèles de sensibilité spectrale dans une modélisation à l'aide d'une image reconstruite à l'aide de mesure multispectrale (Figure 1.9). Nous pouvons constater une grande différence de reconstruction spatiale de la scène alors que qu'on a utilisé le même algorithme et seule la sensibilité spectrale des filtres a changé. L'image en (b) passe à côté de la ligne horizontale mais semble produire des couleurs plus proches de l'image (a). L'image (c) reconstruit bien la ligne horizontale mais produit des couleurs moins proches de (a) que l'image (b). Les auteurs de cette étude vont proposer des modèles de transmittance de filtres idéaux pour différents types de matrices de filtres (comprendre des modèles qui proposent le meilleur compromis d'après leur étude). Regardons celui qu'ils proposent pour une matrice de Bayer et le comparer à des mesures de sensibilité spectrale effectuées sur la caméra ARRI Alexa Studio de l'école (Figure 1.10). On remarque que la caméra semble tenter de suivre le modèle.

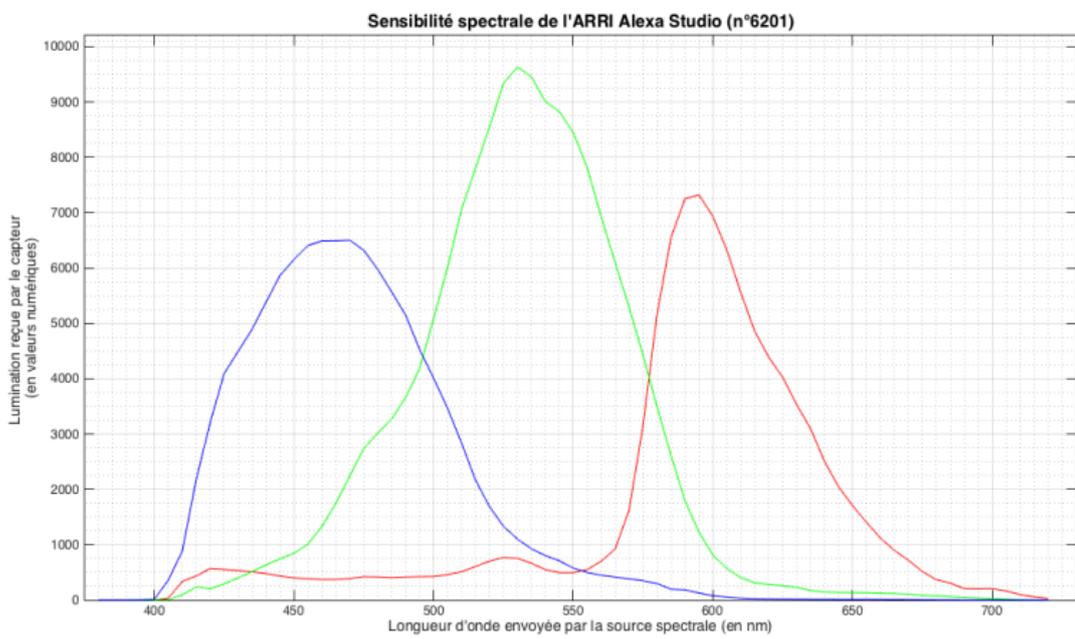
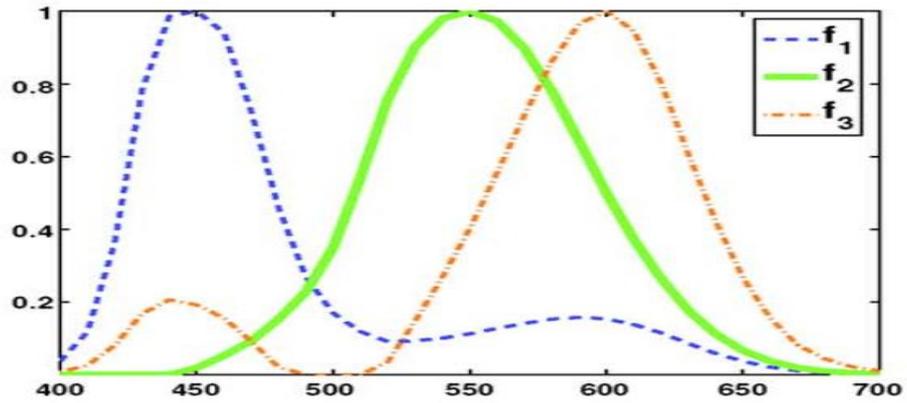


Figure 1.10 (a) Modélisation de sensibilité spectrale RVB idéale d'un filtre de bayer pour la reconstruction de l'image selon M. Parmar et S.J. Reeves ; (b) Mesure de sensibilité spectrale de l'Arri Alexa Studio²⁴.

²⁴ M. Parmar et S.J. Reeves, *Selection of Optimal Spectral Sensitivity Functions for Color Filter Arrays*, IEEE Transactions on Image Processing, Vol 19, N°12, Décembre 2010, p3198 et image issue de mesures faites à l'école.

Les fabricants doivent alors réussir à construire les filtres les plus précis possible et les plus proches possible de modèles comme ceux que proposent M. Parmar et S.J. Reeves s'ils souhaitent se rapprocher des compromis proposés par ces derniers. Il est possible de classifier les filtres en deux catégories : les filtres fabriqués grâce à la teinture et les filtres fabriqués à l'aide de pigments. Les filtres à pigment semblent plus indiqués pour l'utilisation dans les caméras et appareils photos car ils résistent mieux aux températures élevées et à la lumière²⁵. D'autre part, l'évolution des techniques a permis de passer de matrices de filtres en verre que l'on applique sur le capteur à des capteurs avec les CFA directement intégrés sur le silicium. Il semble que la fabrication de filtre à la réponse spectrale très précise et maîtrisée soit une difficulté majeure.

2.2) Choix de matrice

Le type de matrice utilisée va avoir une importance capitale dans la restitution du détail et de la couleur. Il va déterminer toute la suite de la chaîne de traitement de l'image puisqu'il sera responsable d'un sous-échantillonnage spatial grâce au motif de la matrice. Une des conditions de base des matrices de filtres est qu'elles doivent permettre des calculs simples lors du démosaïquage. Cela est d'autant plus important pour le cinéma (dans les autres cas qu'un enregistrement RAW) ou la vidéo car le démosaïquage doit pouvoir se faire en temps réel. Pour cela on utilise des matrices à petits motifs qui se répètent. Cela limite donc le nombre de filtres différents intégrables dans un CFA. D'autre part l'utilisation de petits motifs répétés permet d'éviter qu'un pixel soit perturbé optiquement par ses pixels adjacents. Un problème de l'utilisation de petits motifs répétés

²⁵ NAKAMURA Junichi et al, *Image sensor and digital processing for digital still camera*, Boca Raton, Taylor & Francis, 2006, p63.

est l'apparition de moiré sur l'image. Cela se produit lorsque la fréquence spatiale d'un sujet qui se répète est proche de celle du motif du CFA. L'utilisation de motifs irréguliers évite ce problème tout en augmentant la complexité des calculs de démosaïquage qui seront faits en aval. D'autres problèmes comme du crénelage ou des variations de couleur peuvent survenir. D'autre part, pour augmenter la qualité de restitution des couleurs, il paraît logique d'augmenter le nombre d'échantillons de couleurs distinctes (augmenter le nombre de filtres colorés différents de la matrice) mais cela se fait généralement au détriment de la restitution de détail, de la transmittance des filtres et cela augmente la complexité à produire ces CFA. C'est pourquoi la plupart des capteurs utilisent des matrices à trois couleurs.

On peut voir dans la figure 1.11 différents exemples de motifs de filtres proposés dans la littérature. Le filtre de Bayer (a), proposé par Bryce Bayer en 1976 est le filtre utilisé en majorité pour les utilisations cinéma, photographie et appareils grand public. D'autres filtres ont été utilisés dans la caméra de cinéma, notamment le filtre de Bayer modifié (f) et le filtre en lignes verticales (d). Chacun de ces filtres proposent un compromis différent que ce soit en qualité de restitution des détails, des couleurs, en simplicité de démosaïquage ou encore en simplicité de fabrication. Ainsi les fabricants choisissent un type CFA en fonction de l'utilisation, du type d'optiques, de la taille du capteur ou de la définition du capteur...

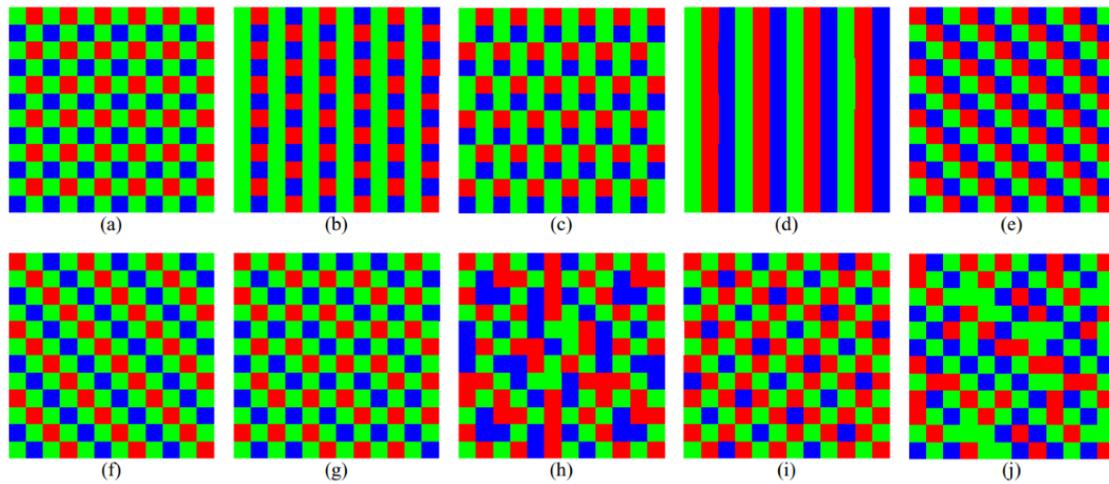


Figure 1.11 (a) CFA de Bayer, (b) CFA de Yamanaka, (c) CFA de Lukac, (d) CFA en lignes verticales, (e) CFA en lignes diagonales, (f) CFA de Bayer modifié, (g à i) CFA pseudo-aléatoires, (j) CFA basé sur la répartition aléatoire des cônes sur la rétine humaine.²⁶

Nous nous intéressons à la matrice de Bayer en particulier dans ce mémoire, car c'est celle qui est utilisée dans toutes les caméras de cinéma numérique (ou presque). Cependant, on constate l'existence de documentation en quantité sur d'autres matrices qui règlent beaucoup de problèmes existants sur la matrice de Bayer et bien d'autres matrices ont été proposées depuis 1976. Bon nombre de publications font la comparaison de la qualité de restitution des images via différents CFA et en proposent de nouveaux, comme par exemple les travaux de R. Lukac et K. N. Plataniotis²⁷ ou ceux de K. Hirakawa et P. J. Wolfe²⁸.

²⁶ R. Likac et K. N. Plataniotis, *Color Filter Arrays: Design and Performance Analysis*, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol 51, N°4, novembre 2005, p1261.

²⁷ R. Likac et K. N. Plataniotis, *Color Filter Arrays: Design and Performance Analysis*, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol 51, N°4, novembre 2005.

²⁸ K. Hirakawa et P.J. Wolfe, *Spacio-spectral Color Filter Array Design for Optimal Image Recovery*, IEEE Transactions on Image Processing, Vol 17, N°10, Octobre 2008.

La matrice de Bayer est remarquable par sa simplicité. Elle est constituée d'un motif de 2x2 pixels comportant deux pixels verts, un pixel rouge et un pixel bleu. Il y a un sous-échantillonnage de chaque composante couleur, ainsi l'échantillonnage du vert est deux fois moindre par rapport à la résolution du capteur et celle du bleu et du rouge est quatre fois moins importante. Cela vient du fait qu'en vidéo, on associait le canal vert à la luminance du signal et que l'on considère que la vision humaine est plus sensible au microcontraste lumineux plutôt qu'au microcontraste coloré. Bryce E. Bayer a donc proposé un système qui mettait en avant l'échantillonnage du vert en vertu de ces deux principes pour une restitution optimale des détails du sujet.

La matrice de Bayer permettait au départ une restitution des couleurs et détails satisfaisante et un coût en termes de puissance de calcul et de complexité algorithmique relativement faible. L'augmentation constante de la puissance de calcul disponible (n'oublions pas la loi de Moore) a permis à la fois une augmentation des résolutions de capteurs et une augmentation de la complexité des algorithmes de démosaïquage. Cependant, plus nous complexifions les algorithmes de démosaïquage, plus les gains apportés semblent faibles : la relation entre le temps de calcul et le gain en qualité d'image n'est pas proportionnelle. Il faut préciser que beaucoup de caméras que l'on décrit comme utilisant une matrice de Bayer utilisent en fait de légères variations du principe établi par Bryce E. Bayer. Chaque fabricant tente d'optimiser le principe et l'on ne peut pas dire qu'il y ait une matrice de Bayer ou un filtre de Bayer mais des matrices ou filtres de Bayer.

Nous avons établi l'origine du capteur CMOS et du filtre de Bayer et nous avons évoqué les limites et les défis de ces deux technologies. Néanmoins, ce ne sont pas les seuls éléments à prendre en compte dans la restitution de l'image, que ce soit pour résoudre le rendu du détail ou la couleur.

C) ÉLÉMENTS LIMITANTS DE LA RESTITUTION DU DÉTAIL

Le capteur et son CFA ne sont pas seuls dans la chaîne du traitement de l'image. Les articles de recherche sur le sujet, isolent le problème qu'ils traitent avec des images de références prises à partir de films ou des images reconstituées à partir de mesures multispectrales, mais dans notre cas, celui d'images de caméra de cinéma, on ne peut ignorer le reste de la chaîne de prise de vue, de traitement de l'image, de la diffusion et même la perception humaine. La qualité de l'image que l'on regarde est toujours déterminée par l'élément le plus faible de la chaîne de prise de vue et de diffusion. D'autre part, nous devons rappeler des limites physiques qui, elles, sont bien liées au matériel.

1) Ensemble Objectif-Caméra

Pour s'intéresser à la restitution du détail, on doit aussi prendre en compte d'autres éléments de la prise de vue qui sont primordiaux : les éléments optiques présents devant le capteur. Si l'on commence par l'objectif, il a une liste de caractéristiques qui détermine la qualité de l'image qui atteint le capteur. La caractéristique primordiale de l'objectif qui nous intéresse est la FTM, ou Fonction Transfert Modulation. Les courbes FTM permettent de caractériser la capacité de l'objectif à résoudre des motifs contrastés selon leur fréquence spatiale. Ainsi pour résumer grossièrement, un objectif dont la FTM est faible va projeter sur le capteur des images moins détaillées qu'un autre dont la FTM est élevée. Pour que la qualité de la matrice et de son démosaïquage entre en compte sur la qualité de l'image finale, la FTM de l'objectif doit être suffisamment élevée. L'objectif doit permettre de projeter des détails assez fins pour le capteur. On constate que depuis toujours, la qualité des optiques augmente constamment et a fortiori depuis le passage au

numérique, où chaque génération de capteur fait un bon en résolution souvent pour la même taille de capteur.

Malgré cela, comme évoqué plus tôt, si les motifs que tentent de reproduire un capteur sont trop fins, cela crée des artéfacts au moment du démosaïquage de l'image. Ainsi, pour éviter ce problème, on place un filtre passe bas (ou OLPF pour Optical Low Pass Filter), qui va venir diffuser légèrement la lumière qui atteint le capteur. Cela est explicable par le théorème de Shannon et Nyquist qui stipule que la fréquence spatiale du motif à reproduire doit être deux fois plus faible au moins que la fréquence spatiale d'échantillonnage du capteur. Ce Filtre passe bas est lui aussi soumis à une caractéristique de FTM (voir figure 1.12). L'objectif idéal doit avoir la FTM la plus élevée possible et les fréquences trop élevées pour le capteur étant filtrées par le filtre passe bas. À l'aide de matériaux biréfringents, l'OPLF peut avoir une FTM dont la forme est idéale pour cette tâche. Ces filtres peuvent être fabriqués à l'aide de cristaux liquides^{29 30}.

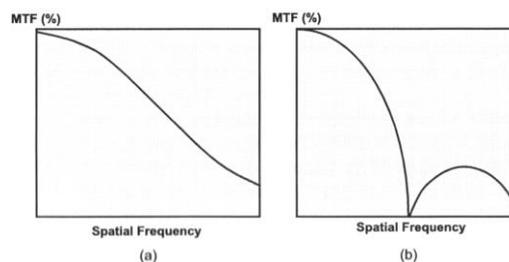


Figure 1.12, (a) Fonction Transfert Modulation d'un objectif ; (b) Fonction Transfert Modulation d'un filtre passe bas³¹.

²⁹ NAKAMURA Junichi et al, *Image sensor and digital processing for digital still camera*, Boca Raton, Taylor & Francis, 2006, p34-36.

³⁰ T. IWANE, "Optical low-pass filter, a camera, an imaging apparatus, and a method of manufacturing an optical low-pass filter", Patent WO200800450A1, Janvier 2008.

R. B. Merrill, « Color separation in an active pixel cell imaging array using a triple-well structure" U.S. Patent 5,965,875, Octobre 1999.

³¹ NAKAMURA Junichi et al, *Image sensor and digital processing for digital still camera*, Boca Raton, Taylor & Francis, 2006, p35.

La surface d'un capteur n'est pas entièrement faite de photosites dédiés à la capture de la lumière. On y place aussi les transistors de sélection, de remise à zéro et source-suiveur, (pour un pixel actif) et d'autres éléments comme simplement le câblage nécessaire au transfert de l'information. Ainsi le photosite ne reçoit pas toute la lumière qui arrive sur le pixel. On exprime le facteur de remplissage, qui est le rapport de la surface du photosite sur la surface du pixel. Il est important de maximiser ce rapport. Pour ce faire on utilise un réseau de microlentilles qui couvrent toute la surface du pixel et concentre les rayons sur le photosite (voir figure 1.13). Cet élément permet de rendre le capteur plus sensible, mais augmente aussi sa résistance aux artefacts en permettant une surface d'échantillonnage plus grande pour chaque pixel.

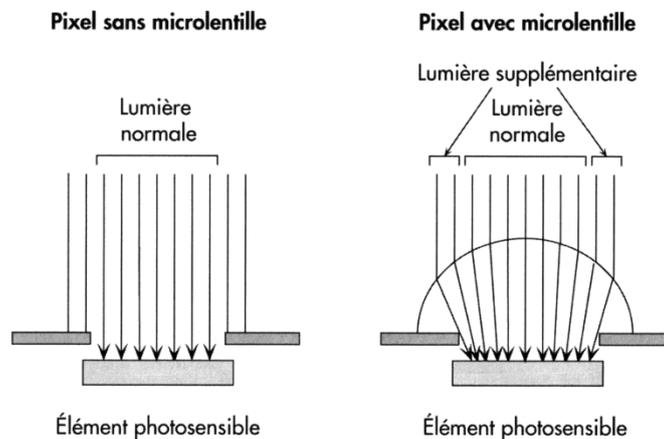


Figure 1.13, Illustration d'un pixel avec et sans microlentille³².

³² P. BELLAICHE, *Les secrets de l'image vidéo*, Paris, Eyrolles, 2011, p175.

Si l'on tourne en RAW, le traitement des informations est relativement faible dans la caméra. Les informations recueillies par les photosites sont traitées contre différents types de bruit, amplifiées, puis converties en valeurs numériques avant d'être enregistrées dans un fichier. L'échantillonnage et la quantification qui permettent de sauvegarder les valeurs dans un fichier numérique peuvent induire aussi des erreurs.

D'autre part, on a tendance à croire que le numérique nous a apporté la praticité de pouvoir voir sur un moniteur au tournage ce que l'on aura dans le fichier. Cette idée est fautive (rien qu'avec le principe du RAW, même si les fabricants peuvent proposer une « prévisualisation » du RAW et même dans les formats où le démosaïquage se fait dans la caméra) car la débayerisation proposée sur les sorties vidéos n'est pas forcément la même que celle effectuée sur le fichier et surtout il y a une interpolation pour adapter l'image au moniteur. On passe par la suite à la chaîne de post traitement qui peut encore être un élément limitant dans la restitution des détails et des couleurs.

2) Traitement en laboratoire

Pour un tournage RAW, le dématriçage s'effectue en post production. C'est évidemment une étape importante pour la restitution des détails et des couleurs. Premièrement, pour une bonne restitution, un traitement réducteur de bruit doit être effectué. Cela peut se faire avant ou en même temps que le démosaïquage bien que cette seconde solution semble plus efficace³³. Deuxièmement, on choisit un algorithme pour le

³³ D. Paliy et al., *Denoising an Interpolation of Noisy Bayer Data with Adaptive Cross-Color Filters*, Institute of Signal Processing, Tampere University of Technology and Nokia Research Center, 2008 [en ligne] <http://www.cs.tut.fi/~lasip/papers/DenoisingInterpolationNoisyBayerDatawithCrossColorFilters-VCIP2008.pdf>

dématriçage des informations du capteur et pour l'utilisateur ce choix est critique car il peut donner d'excellents résultats comme des images de piètre qualité. Comme l'information colorée est créée à cette étape, on doit aussi l'amener dans un espace colorimétrique. Bien que ce ne soit pas le sujet de ce mémoire, c'est aussi une étape critique. Généralement, pour un film, vient ensuite l'étape d'étalonnage des images qui consiste à modifier numériquement les images pour marquer les effets préparés au tournage. On va alors enregistrer les résultats de manière définitive dans un fichier master à partir duquel seront créés les DCP (Digital Cinema Package). Les DCP sont les fichiers qui seront lus à la projection.

3) Projection et Mise à l'Échelle

Le choix du mode diffusion est important. Si l'on est dans le cas d'une diffusion numérique en salle de projection, il est important de prendre en compte plusieurs éléments : Type de fichier utilisé (DCP ou autres), définition des fichiers, type et résolution du projecteur, méthode d'interpolation de la mise à l'échelle du projecteur si interpolation il y a, taille et distance de l'écran par rapport au spectateur, qualité et réglage de l'objectif de projection (là encore, la FTM va jouer...). Ce qui est important à remarquer, c'est qu'il y a aussi une interpolation des pixels pour la diffusion. Un projecteur a en effet une matrice de pixel lui aussi et si l'image qu'il doit projeter à une définition différente, il y a une interpolation qui entre en jeu et elle doit être la moins destructrice possible. La technologie de la projection entre aussi en jeu.

Pour une diffusion sur écran actif, les mêmes questions se posent. Un écran actif est aussi constitué d'une matrice de pixels rouges verts et bleus. La forme et l'ordre de cette matrice peut varier aussi et changer le rendu du détail dans l'image. La technologie a aussi une grande influence sur le rendu du détail : rien que l'utilisation de sous pixels ronds ou rectangulaires influe sur le rendu et peut accentuer ou réduire la sensation de crénelage ou de moiré dans

l'image indépendamment de la disposition de la matrice du capteur et de son démosaïquage.

Après avoir présenté les origines, le fonctionnement et les enjeux des matrices de filtres colorés, nous allons étudier les défauts qu'elles peuvent induire, la manière de les évaluer et nous allons regarder quelques algorithmes de démosaïquage proposés dans la littérature.

PARTIE II : ALGORITHMES, DÉFAUTS ET ÉVALUATION DE
L'ENSEMBLE MATRICE/ALGORITHME

Nous nous proposons dans cette partie de recenser et expliquer les défauts d'images liés à la restitution du détail (coloré ou non), qui arrivent à cause de choix faits sur les CFA par les fabricants de caméra et de capteurs et par les laboratoires et/ou les utilisateurs lors du démosaïquage. Nous tenterons ensuite de proposer une classification non exhaustive (il est impossible de recenser tous les types de démosaïquage en regard de l'abondance de la littérature sur le sujet) des méthodes de démosaïquage et nous nous attarderons sur l'évaluation de l'efficacité des démosaïquage.

A) DÉFAUTS DUS AUX MATRICES DE FILTRES ET LEUR DÉMOSAÏQUAGE

1) Notions de définition et de résolution

Il convient de bien différencier deux notions qui sont souvent mélangées et confondues, à savoir la définition et la résolution.

En numérique, quand on parle du nombre de pixels, on parle de la définition. Pour un capteur : la définition est le nombre de photosites présents sur la surface photosensible du capteur. Pour un fichier : la définition est le nombre de pixels qui composent ce fichier. Pour un écran/projecteur numérique : la définition est le nombre de pixels qui composent la matrice d'affichage de ce dernier.

On peut se référer à la définition de plusieurs façons. Nous pouvons la formuler en une expression comportant le nombre d'éléments en largeur par le nombre d'éléments en longueur, ou simplement par le nombre total d'éléments. Pour une utilisation en image vidéo ou cinématographique, on aime aussi simplement se référer à la définition par le nombre d'éléments dans la largeur de l'image. Par exemple : il est possible de se référer à une image en disant qu'elle a une définition de 4096x2300, ou de 9,4 mégapixels, ou alors que c'est une image en 4k (attention au ratio d'image dans ce cas). Il en va de même pour les capteurs, les fabricants jouent sur des amalgames possibles pour afficher les meilleurs chiffres, ou, du moins, les services technico-marketing peinent parfois à traduire les choix de design des capteurs, d'échantillonnage et d'interpolation en données chiffrées simplement comparables et compréhensibles...

Pour prendre en compte la taille du capteur et des photosites, on doit alors introduire la notion de résolution : la résolution est le nombre de pixels ou d'éléments rapporté à la longueur sur laquelle est réparti ce nombre d'éléments. Pour une caméra : c'est le nombre de photosites d'une ligne divisé par la longueur photosensible du capteur.

Un fichier numérique n'a pas de résolution intrinsèque puisque c'est son affichage qui régit la résolution. Une image peut néanmoins avoir dans ses métadonnées une information de résolution prévue pour une impression par exemple. Pour un affichage : c'est le nombre de points affichés d'une ligne divisé par la longueur de l'écran.

La résolution peut s'exprimer en Pixel Par Pouce (PPP) (ou PPI pour Pixel Per Inch) lorsque l'on parle d'un écran de diffusion. Par exemple un écran 16/9 d'une diagonale de 24 pouces avec une définition de 1920x1080 a une résolution de 92 PPP. Pour un affichage, elle va, pour une définition donnée, déterminer la dimension des éléments de l'image et aussi les dimensions de l'image.

Finalement, pour un écran de taille fixe et une distance de visionnage donnée, on peut avoir différentes résolutions affichées avec une définition qui varie en conséquence. Une définition plus faible entrainera une résolution plus faible et donc la sensation de détail sera amoindrie. Pour une définition fixe, il est possible de faire varier la résolution à condition d'augmenter ou baisser la taille de l'écran. La sensation de détail sera alors plus faible si les dimensions de l'écran augmentent et la résolution diminue (toujours à la même distance de visionnage). Enfin, pour une résolution fixe, nous pouvons faire varier la définition à condition d'augmenter ou baisser la taille d'écran de manière adéquate. Dans ce cas, la sensation de détail sera la même quel que soit le choix de définition et la taille d'écran. La distance de visionnage et l'acuité visuelle ont aussi une influence sur la perception des détails.

D'autre part, il est à noter que les définitions ne sont pas forcément les mêmes dans toutes les étapes de la chaîne de l'image (de la captation à la diffusion). Ainsi, un tournage s'effectue dans une définition (et quelquefois dans plusieurs définitions) alors que le master pour projection en salle est fait dans une autre définition. Il y a donc une étape intermédiaire d'interpolation des pixels du fichier issu du tournage pour obtenir une autre définition : cela peut être vers une définition supérieure avec en conséquence un suréchantillonnage ou vers une définition inférieure, ce qui induit un sous-échantillonnage.

Cette interpolation, quel que soit la définition ciblée, a une influence sur la restitution du détail.

2) Artéfacts et Défauts dus aux Matrices de Filtres et au Démosaïquage

2.1) Aliasing : Moiré et Crénelage

Les défauts les plus courants que l'on retrouve dans l'image vidéo et de cinéma numérique sont ceux liés à l'aliasing ou repliement de spectre. L'aliasing se produit quand la fréquence d'échantillonnage spatial du capteur est inférieure à deux fois la fréquence spatiale de l'image formée sur le capteur, c'est à dire quand la distance entre deux photosites est plus grande que celle entre les éléments de l'image projetée par l'objectif sur le capteur. Il existe deux phénomènes différents regroupés sous le terme anglophone aliasing : le moiré et le crénelage.

Un motif de bandes appelé moiré peut apparaître. Le moiré apparaît souvent dans les sujets à structure périodique. Ce défaut peut arriver aussi plus tard dans la chaîne de traitement de l'image, avec certaines manipulations de l'image. Cependant il est le plus marqué lorsque qu'il se forme au niveau du capteur. En effet l'apparition de moiré dans le traitement de l'image peut être évitée avec les bonnes manipulations. Si le moiré est apparu à la prise de vue, il est alors impossible de l'éviter plus tard dans la chaîne de traitement. Les capteurs à matrice de Bayer sont encore plus sensibles à ce défaut car l'échantillonnage pour chaque canal est encore plus faible (par rapport à un système qui échantillonne les trois canaux en chaque pixel du capteur). Comme l'échantillonnage rouge et bleu est encore plus faible, nous pouvons constater l'apparition de moiré coloré. Ce défaut est rédhibitoire car il est extrêmement simple à repérer et assez dérangeant. Les algorithmes de démosaïquage jouent également un grand rôle dans l'apparition du moiré car ils reconstruisent l'information couleur manquante pour chaque pixel. Si le

démosaïquage fait apparaître par exemple un motif avec une forte variation de valeur de luminosité répété sur l'ensemble des pixels images, alors la superposition de ce motif sur celui du sujet va créer un moiré. D'autre part, le moindre mouvement dans un cas de moiré va exacerber le défaut.

Le crénelage est un effet qui apparaît dans les zones de forts contrastes. Les bords d'un trait oblique peuvent ne pas être rendus de manière optimale. Cela peut se manifester alors par une représentation de ce trait oblique dans l'image avec un effet d'escalier : plutôt qu'une transition parfaitement droite à la limite entre les deux aplats de couleurs le long du trait, on a une transition qui se décale d'une valeur égale à la largeur d'un pixel de temps en temps.

Il est difficile de lutter contre ces défauts une fois la prise de vue effectuée, c'est la raison de l'emploi du filtre passe bas comme évoqué en première partie. Une meilleure solution serait de suréchantillonner l'image et de revenir à une définition plus faible en appliquant des calculs de moyenne intelligents entre les pixels.

2.2) Défauts de Démosaïquage

Les principaux artefacts de démosaïquage sont les effets de Blurring (flou), de Zipper (fermeture éclair) et de False Color (fausse couleur). Ces défauts sont toujours présents, aucun algorithme de démosaïquage n'arrive à s'en débarrasser totalement.

L'effet de blurring se caractérise par une atténuation des transitions et une perte des détails très fins. Cet effet est plus marqué avec des méthodes de démosaïquage qui proposent des interpolations équivalentes à l'utilisation d'un filtre passe bas, comme la méthode bilinéaire. Dans les zones de hautes fréquences spatiales de l'image, le filtrage

bilinéaire utilise les pixels voisins pour faire une moyenne, cela revient à lisser l'image. Cependant ce défaut peut aussi toucher d'autres méthodes de démosaïquage.

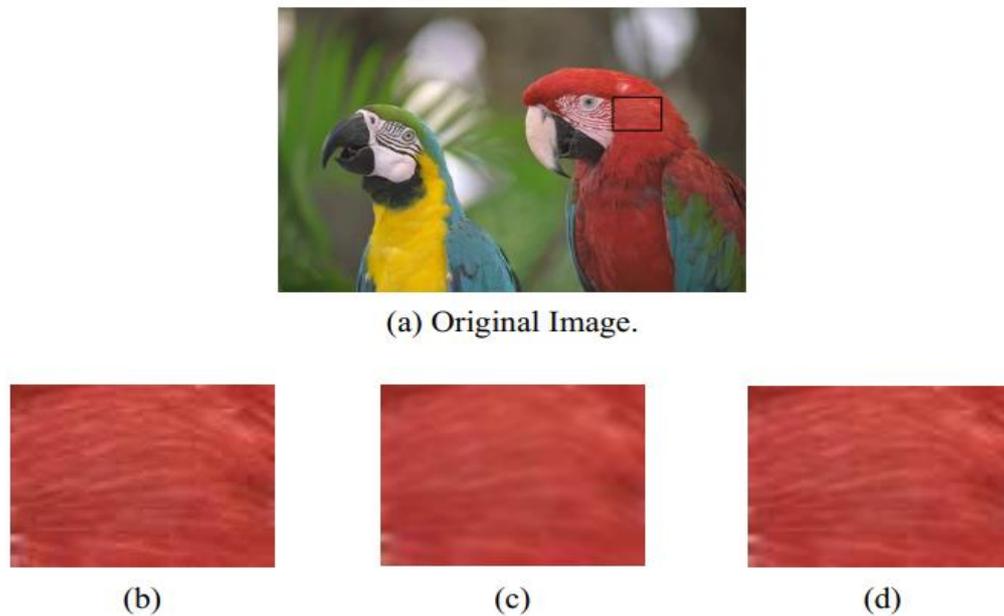


Figure 2.1, Illustration du défaut de blurring avec deux méthodes de démosaïquage. (a)(b) image originale (c) démosaïquage « bilinéaire » (d) démosaïquage Hamilton et Adams³⁴.

Dans la figure 2.1 on peut voir la comparaison d'un démosaïquage au fort effet de blurring (c) de l'image originale (b) et d'un démosaïquage avec peu ou pas de blurring. L'image (c) est floue et le motif des plumes presque indiscernable : il n'y a pas de détail. L'image (d) est presque aussi détaillée que l'image (b).

³⁴ O. LOSSON et al, *Comparison of color demosaicing methods*, Advances in Imaging and Electron Physics, Elsevier, 2010, 162.

L'effet de fermeture éclair (zipper effect) produit un motif crénelé coloré le long des transitions horizontales, verticales ou diagonales. Il se manifeste souvent dans des couleurs cyans ou orangées. R. Zhen et R.L. Stevenson décrivent cet effet comme un pattern « on-off » dans les régions autour de bords dans l'image³⁵. Cet effet est principalement causé par une mauvaise interpolation le long de la limite d'un objet de la scène. Pour être plus précis, c'est parce que l'interpolation utilise des échantillons de part et d'autre de la limite de l'objet et non le long de l'objet. Si l'interpolation se fait de manière orthogonale à la limite de l'objet, le pixel calculé représentera une couleur différente de l'objet. Nous pouvons constater dans la figure 2.2 un exemple d'image avec l'effet de fermeture éclair. La partie b de l'image montre des couleurs erronées autour des bords des barrières selon un motif cyan et orange.

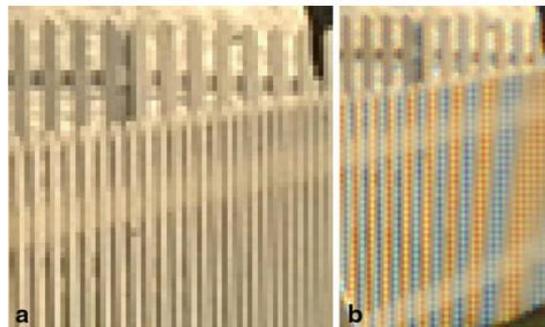


Figure 2.2, Illustration du défaut de zipper (a) image originale (b) effet zipper après interpolation bilinéaire de l'originale³⁶.

³⁵ E. CELEBI et al, *Color and Video Enhancement*, Springer, Heidelberg, 2015, "The zipper effect refers to the abrupt or unnatural changes of intensities over a number of neighboring pixels, manifesting as an "on-off" pattern in regions around edges."

³⁶ E. CELEBI et al, *Color and Video Enhancement*, Springer, Heidelberg, 2015, p18.

Encore une fois cela peut se voir facilement dans les images provenant d'une interpolation bilinéaire mais les algorithmes plus avancés proposent des solutions à ce problème.

L'effet de fausses couleurs est simplement un écart trop important entre la couleur estimée du pixel par l'algorithme et la couleur qu'il devrait prendre. La couleur du pixel devient aberrante. Ce phénomène ne se caractérise pas par une structure géométrique remarquable. Ce défaut se retrouve souvent dans des zones de hautes fréquences spatiales du sujet, tel que des branchages par exemple. Nous pouvons observer dans la figure 2.3 un exemple de fausse couleur dans une interpolation bilinéaire.

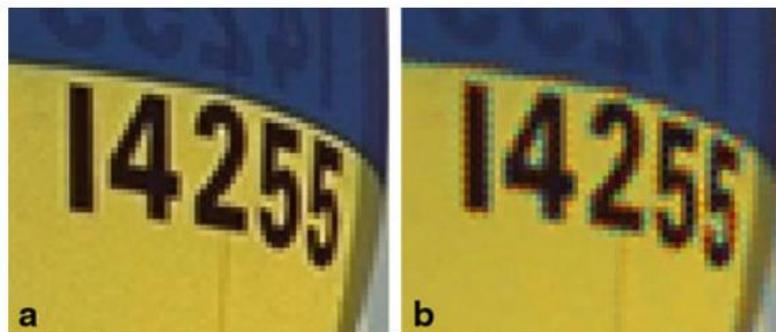


Figure 2.3, Illustration du défaut de false color. (a) image originale (b) effet de false color après interpolation bilinéaire de l'original³⁷.

Les artéfacts d'effet de fermeture éclair et de fausses couleurs sont souvent regroupés ensemble car ce sont tous deux des artéfacts d'erreur d'interprétation de couleur la plupart du temps causés par des erreurs dans la direction de l'interpolation faite par l'algorithme. En effet, ce défaut se produit quand la direction du motif est proche de celle de l'interpolation (horizontale ou verticale). Pourtant, une image n'ayant pas ces

³⁷ E. CELEBI et al, *Color and Video Enhancement*, Springer, Heidelberg, 2015, p18.

caractéristiques de direction du motif peut quand même comporter des erreurs alors appelées artéfacts d'interpolation. Quelque soit le démosaïquage et sa complexité, il existera toujours des artéfacts d'interpolation. Ces derniers sont néanmoins moins visibles que des artéfacts de type fermeture éclair.

Finalement, les artéfacts dus à l'interpolation sont une caractéristique de l'image numérique. Ils en sont tellement indissociables que la recherche s'intéresse à la détection de ces artéfacts dans un but d'identifier les images retouchées numériquement.

B) ALGORITHMES DE DÉMOSAÏQUAGE

1) Principes de démosaïquage

1.1) Approche du démosaïquage

Nous avons vu dans la Partie 1 les principes des matrices de filtres colorés et plus en détail celui des matrices de Bayer. Nous allons ici décrire les principes généraux du démosaïquage d'informations issues d'une matrice de Bayer et proposer une présentation de quelques méthodes reconnues dans la littérature. Nous proposons une sélection de méthodes basées sur l'étude d'O. Losson et al³⁸.

Le démosaïquage est l'étape qui permet de recréer l'information couleur manquante pour chaque pixel. En effet, les matrices de Bayer comme tout CFA ne peuvent échantillonner les couleurs de chaque canal en un seul pixel du capteur. B.E. Bayer propose une alternance de filtres rouges, verts et bleus selon la proportion suivante : deux pixels verts pour un pixel bleu et un pixel rouge. Cette répartition s'effectue sur un motif de 2 par 2 pixels qui se répète. En voici la représentation en figure 2.4 (a). Cette répartition induit un sous-échantillonnage du canal vert d'un rapport de $\frac{1}{2}$ (b) et ce rapport se réduit à $\frac{1}{4}$ pour le canal rouge (c) et le canal vert (d). La raison de cette répartition inégale des échantillons est discutée dans la Partie 1. Finalement, nous pouvons considérer que c'est avec un rapport de $\frac{1}{3}$ que l'information de couleur est globalement sous-échantillonnée (3 canaux avec rapport de $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ et $\frac{1}{4}$). On comprend alors l'intérêt primordial d'un

³⁸ O. LOSSON et al, *Comparison of color demosaicing methods*, Advances in Imaging and Electron Physics, Elsevier, 2010, 162.

dématriçage efficace à la fois pour l'estimation correcte des couleurs et pour la restitution du détail.

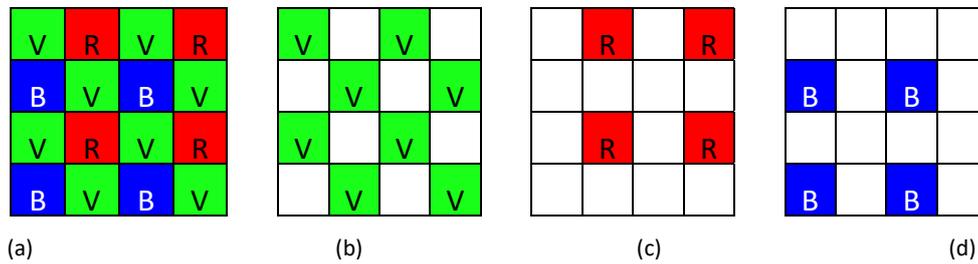


Figure 2.4. Schéma d'une matrice de Bayer et représentation de l'échantillonnage de chaque canal
 (a) Matrice de Bayer, (b) Échantillonnage du canal vert, (c) Échantillonnage du canal rouge,
 (d) Échantillonnage du canal bleu.

Le but du démosaïquage est donc d'estimer les valeurs manquantes de 2 canaux d'un pixel à partir de celles des pixels alentours. À partir de la Figure 2.4 on peut alors déduire 4 cas de figures quand on cherche à calculer les valeurs manquantes d'un pixel.

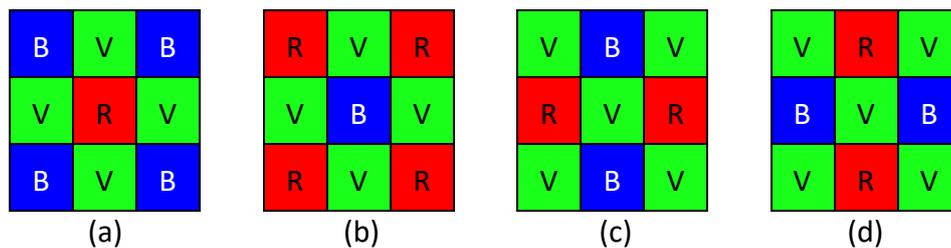


Figure 2.5. Les 4 cas de motifs de pixels voisins rencontrés lors du démosaïquage d'une matrice de Bayer (a) [VRV], (b) [VBV], (c) [RVR], (d) [BVB].

La figure 2.5 représente les 4 cas de structure de voisinage spatial que peuvent rencontrer les algorithmes sur une matrice de Bayer dans une fenêtre de 3x3 pixels. On cherche pour chaque cas à trouver les valeurs manquantes dans les deux canaux absents du pixel central de la structure. Ces valeurs peuvent être trouvées grâce aux valeurs présentes dans les canaux des pixels voisins. On constate que [VRV] (a) présente une structure similaire à [VBV] (b) (seuls R et B sont permutés) et ils peuvent donc être traités de la même manière pour reconstruire l'information des canaux manquants en leur pixel

central. [RVR] (c) et [BVB] (d) ont aussi des structures similaires (avec les mêmes permutations entre R et B) et peuvent être traités identiquement pour retrouver l'information dans les canaux manquants de leur pixel central. Cette représentation permet de comprendre la redondance des traitements à effectuer. En réalité seuls les algorithmes les plus simples vont chercher les informations manquantes d'un pixel dans les pixels directement voisins. Les autres utilisent des fenêtres plus grandes que 3x3 pixels ou vont chercher des informations plus éloignées horizontalement ou verticalement du pixel à traiter.

1.2) Classification et propriétés à suivre

Les évolutions au fil du temps et la pluralité des approches par les chercheurs mènent à une classification des algorithmes en plusieurs familles. Il est possible de distinguer deux principales familles : Les algorithmes qui suivent une analyse spatiale et les algorithmes qui suivent une analyse fréquentielle. Dans tous les cas, les algorithmes doivent suivre deux propriétés :

- La corrélation spectrale. B.K. Gunturk et al³⁹ montrent que les niveaux des trois composants sont fortement corrélés dans la nature et à fortiori dans les hautes fréquences spatiales. On utilise différents principes pour arriver à exploiter cette propriété dont deux ressortent le plus⁴⁰ : la constance locale du rapport des canaux et la constance locale de leur différence. D.R.

³⁹ B.K. GUNTURK et al, *Color plane interpolation using alternating projections*, IEEE Transactions on Image Processing, vol 11, n°9, p.997-1013, septembre 2002.

⁴⁰ O. LOSSON et al, *Comparison of color dimesaicing methods*, Advances in Imaging and Electron Physics, Elsevier, 2010, p18.

COK⁴¹ a proposé en 1^{er} la constance locale de la teinte (rapport chrominance/luminance avec les rapports R/V et B/V). La constance locale de la différence des canaux est étudiée elle par N.X. Lian⁴² et est souvent utilisée dans la littérature.

- La corrélation spatiale. Nous pouvons considérer une image couleur comme une succession d'aplats de couleurs. Dans un aplat, les pixels ont des niveaux comparables au sein d'un canal. Il est donc possible d'utiliser les niveaux des pixels voisins pour estimer le niveau du pixel manquant. C'est efficace sauf dans les zones de transition entre des aplats. On doit donc éviter lors du démosaïquage d'interpoler les canaux manquant d'un pixel en utilisant des pixels proches mais n'étant pas situés sur le même aplat. Ce principe est souvent utilisé pour faire l'estimation du canal vert car il est le mieux échantillonné spatialement et que d'après les principes émis par B.E. Bayer, il représente au mieux la luminance de l'image. Toujours d'après B.E. Bayer, ce qui correspond à la chrominance (canal rouge et bleu) est estimé dans un second temps avec la luminance et la propriété de corrélation spectrale.

⁴¹ D.R. COK, «Signal processing method and apparatus for sampled image signals», U.S. patent 4,630,307, to Eastman Kodak Co., Patent and Trademark Office, Washington D.C., décembre 1986.

⁴² LIAN N., CHANG L., TAN Y.-P., «Improved color filter array demosaicking by accurate luminance estimation», *Proceedings of the 12th International Conference on Image Processing (ICIP'05)*, vol. 1, Genève, Italie, p. I-41-4, septembre 2005.

2) Méthodes de démosaïquage

Pour simplifier la façon de formuler les calculs proposés par les algorithmes, nous allons nous référer à la matrice suivante (figure 2.6) où nous avons numéroté les pixels de manière correspondante à leurs coordonnées. Pour se référer à la valeur d'un canal d'un pixel, nous la désignerons par une lettre correspondant au canal et ses coordonnées. Par exemple, la valeur du canal rouge du premier pixel de cette matrice sera désignée par R1.1. Cette valeur n'a pas besoin d'être interpolée puisque ce pixel est dédié au canal rouge.

R1.1	V1.2	R1.3	V1.4	R1.5
V2.1	B2.2	V2.3	B2.4	V2.5
R3.1	V3.2	R3.3	V3.4	R3.5
V4.1	B4.2	V4.3	B4.4	V4.5
R5.1	V5.2	R5.3	V5.4	R5.5

Figure 2.6 Numérotation des pixels de la matrice de Bayer qui nous servira de référence.

2.1) Premières méthodes proposées : copie de pixels, interpolation bilinéaire et constante de teintes

La méthode la plus simple est celle de la copie de pixels. Elle traite chaque canal de manière indépendante. Cette méthode consiste à recopier dans le pixel à traiter la valeur d'un pixel voisin pour les canaux qui n'ont pas d'information. On effectue en fait un décalage spatial des valeurs dans chaque canal. C'est ce qu'illustre la figure 2.7. Nous y constatons que le décalage de valeur est différent pour le canal vert (a) des deux autres (b) (c). On peut se douter que cette méthode génère des artéfacts de crénelage et de fausses couleurs assez visibles.

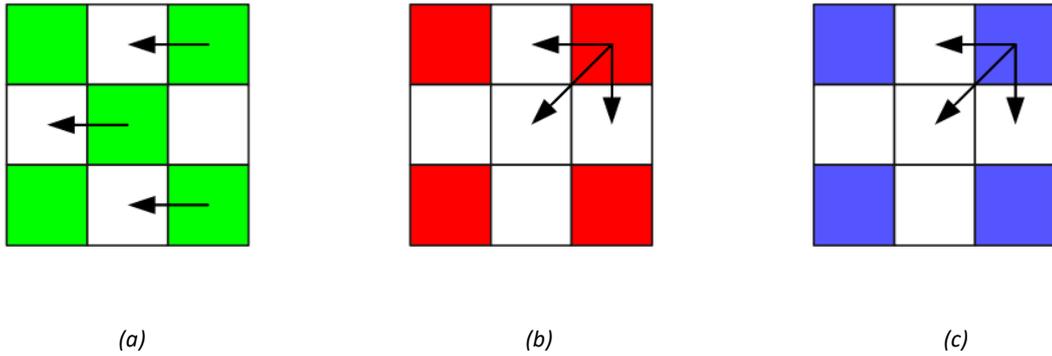


Figure 2.7 Représentation du décalage pour chaque canal⁴³.

Une autre méthode simple est la méthode bilinéaire. Elle propose en quelque sorte de lisser les résultats de valeurs d'un pixel en appliquant une moyenne à partir des pixels voisins. On vient faire une interpolation linéaire verticale et horizontale. Si l'on se réfère à la figure 2.6 il est possible de chercher la valeur des canaux bleus de certains pixels : B3.3, B2.3 et B3.2. On peut alors poser :

$$B3.3 = \frac{B2.2 + B2.4 + B4.2 + B4.4}{4}$$

$$B2.3 = \frac{B2.2 + B2.4}{2}$$

$$B3.2 = \frac{B2.2 + B4.2}{2}$$

⁴³ H. Phelippeau, *Méthodes et algorithmes de dématricage et de filtrage du bruit pour la photographie numérique*, Université Paris-Est, 2009.

La méthode bilinéaire induit des artefacts de blurring, des fausses couleurs et des artefacts de zipper (voir partie II.3. Elle est donc assez peu performante.

Enfin, voici la méthode de constance de teinte. En constatant que la teinte varie peu pour un objet dans l'image, D.R. Cok⁴⁴ suggère d'interpoler la teinte en lieu de chaque couleur séparément. Ce système devrait éviter l'apparition de fausses couleurs. On appelle ici la teinte le rapport entre Rouge et Vert (R/V) et Bleu et Vert (B/V).

Dans cette méthode, on interpole les pixels verts manquants grâce à une interpolation bilinéaire et l'on calcule les teintes R/V et B/V pour les pixels rouges et bleus. On continue avec une interpolation bilinéaire des valeurs de teintes des pixels rouges et bleus et on finit par multiplier les résultats par les valeurs de V pour avoir les valeurs de R et de B correspondantes. En référence à la figure 2.6 on peut alors poser en exemple l'équation suivante pour le pixel B3.3 :

$$B_{3.3} = G_{3.3} \times \frac{\frac{B_{2.2}}{G_{2.2}} + \frac{B_{2.4}}{G_{2.4}} + \frac{B_{4.2}}{G_{4.2}} + \frac{B_{4.4}}{G_{4.4}}}{4}$$

D.R. Cok proposera plus tard, pour améliorer les résultats et abaisser la complexité des calculs, de prendre le logarithme de l'intensité des pixels dans le calcul des teintes pour que la division devienne une soustraction. Il en résulte des résultats meilleurs.

Cette méthode est importante. D'une part son algorithme est repris par plusieurs autres méthodes et d'autre part son principe d'exploiter les relations entre les canaux

⁴⁴ COK, D.R, "Signal processing method and apparatus for producing interpolated chrominance values in a sampled color image signal" US Patent 4,642,678, 1987.

plutôt que chaque canal rouge, vert ou bleu de manière indépendante est repris dans la plupart des algorithmes postérieurs à celui de D.R. Cok.

2.2) Méthodes par analyse spatiale

Le premier à proposer une méthode par analyse spatiale fut encore D.R. Cok⁴⁵. En effet, la méthode de la constance de teinte est efficace pour estimer les couleurs à l'intérieur d'un objet, mais il faut améliorer son comportement au niveau des contours des objets. D.R. Cok propose alors de classer la matrice de 3x3 pixels autour de la valeur manquante dans 3 catégories : contour (Edge), bande (Stripe) et coin (Corner). Cette classification se fait grâce à la comparaison dans le canal vert des 4 pixels voisins de celui à interpoler avec leur moyenne.

Cela se fait de la manière suivante (nous pouvons nous référer à la figure 2. 8) : (a) Contour si 3 pixels sont supérieurs (h sur la figure) et 1 inférieur (b sur la figure) à la moyenne ou 1 supérieur et 3 inférieurs, (b) bande si 2 supérieurs et 2 inférieurs à la moyenne et opposés par paires au pixel à interpoler, (c) coin si 2 supérieurs et 2 inférieurs à la moyenne et adjacents par paires au pixel à interpoler. Il y a aussi des cas spéciaux si 2 pixels sont égaux à la moyenne. L'interpolation se fait ensuite en utilisant la médiane des 4 pixels pour un contour, un calcul sur les 8 pixels alentour du canal vert pour une bande et un calcul sur 4 pixels alentour du canal vert pour un coin.

⁴⁵ COK D. R., *Reconstruction of CCD images using template matching*, Proceedings of the IS&T's 47th Annual Conference, Physics and Chemistry of Imaging Systems (ICPS'94), vol. 2, Rochester, New York, U.S.A., p. 380-385, mai 1994.

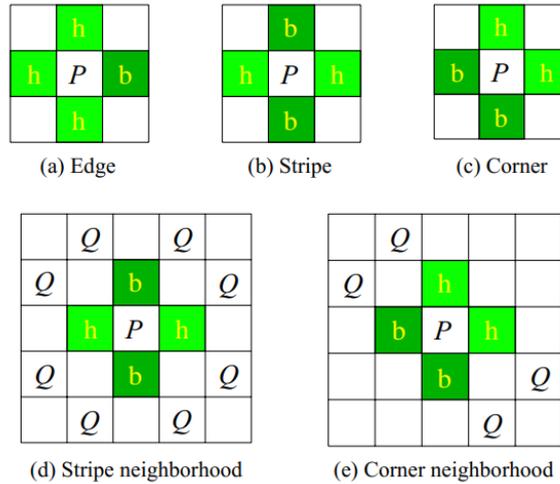


Figure 2.8. Représentation des cas de figures déterminants le choix de motifs de la méthode de D.R. Cok⁴⁶ ou P est le pixel à interpoler et Q les pixels utilisés pour les calculs de P ⁴⁷.

Cette méthode permet une première approche d'un démosaïquage qui s'adapte au contenu de l'image en utilisant trois cas possibles. Mais le critère utilisé pour détecter les trois cas est encore simpliste et n'est pas forcément suffisant pour les détecter correctement. D'autre part, dans le cas motifs longitudinaux ou à bandes, leur direction n'est pas prise en compte. On peut voir le résultat de ce démosaïquage sur une image test dans la figure 2.11 dans la sous partie C.

La direction d'interpolation est importante : dans le cas d'un pixel situé en un point de changement entre deux aplats, il faut estimer la valeur manquante le long de la

⁴⁶ H. Phelippeau, *Méthodes et algorithmes de dématricage et de filtrage du bruit pour la photographie numérique*, Université Paris-Est, 2009.

⁴⁷ O. LOSSON et al, *Comparison of color domesaicing methods*, Advances in Imaging and Electron Physics, Elsevier, 2010, p18

transition et non au travers. Pour estimer la direction d'interpolation, une méthode d'analyse spatiale est proposée par J.F. Hamilton⁴⁸ et se repose sur des évolutions de la méthode de D.R Cok proposée par R.H. Hibbard⁴⁹ et C.A. Laroche⁵⁰. Hibbard utilise des gradients horizontaux et verticaux pour trouver la direction dans laquelle l'interpolation est la meilleure pour ensuite estimer la valeur manquante. Laroche propose de regarder dans un voisinage de 5x5 pour trouver la direction de la transition dans l'image. Hamilton propose d'utiliser ces deux idées à la fois. Pour estimer le sens d'interpolation, on utilise ici des différences dans le sens horizontal et vertical.

X. Wu⁵¹ propose une autre façon d'estimer la direction d'interpolation. On calcule deux niveaux « candidats » pour interpoler la valeur du canal vert manquant du pixel avec d'une part les pixels voisins horizontaux et d'autre par les pixels voisins verticaux. On estime ensuite la valeur du rouge et du vert selon les deux directions et on sélectionne celle dont la différence avec le canal vert est la plus faible. On aurait donc choisi la meilleure direction d'interpolation et l'on a qu'à reprendre le résultat du calcul déjà effectué. Cette méthode est ensuite similaire à celle d'Hamilton pour interpoler les valeurs manquantes mais permet une meilleure détermination de la direction d'interpolation.

⁴⁸ HAMILTON J. F., ADAMS J. E., « Adaptive color plan interpolation in single sensor color electronic camera », U.S. patent 5,629,734, to Eastman Kodak Co., Patent and Trademark Office, Washington D.C., mai 1997.

⁴⁹ HIBBARD R. H., « Apparatus and method for adaptively interpolating a full color image utilizing luminance gradients », U.S. patent 5,382,976, to EastmanKodak Co., Patent and Trademark Office, Washington D.C., janvier 1995.

⁵⁰ LAROCHE C. A., PRESCOTT M. A., « Apparatus and method for adaptively interpolating a full color image utilizing chrominance gradients », U.S. patent 5,373,322, to Eastman Kodak Co., Patent and Trademark Office, Washington D.C., juin 1993.

⁵¹ WU X., ZHANG N., *Primary-consistent soft-decision color demosaicking for digital cameras*, IEEE Transactions on Image Processing, vol. 13, n° 9, p. 1263-1274, septembre 2004.

Les trois méthodes précédentes nécessitent une étape de classification des pixels voisins avant de réaliser l'interpolation. R. Kimmel⁵² a proposé de réunir ces étapes en une seule avec une interpolation linéaire à pondération adaptative. On va donner un poids à chaque canal des pixels voisins. Chaque poids est ajusté en tenant compte de la forme rencontrée dans le voisinage pour que l'interpolation s'adapte aux transitions dans l'image. Ici, c'est la détermination des poids qui est importante pour la qualité résultante de l'image. D'autres auteurs ont proposé des améliorations pour le calcul des poids, comme par exemple R. Lukac⁵³.

On constate que pour les méthodes basées sur une analyse spatiale, on interpole souvent le canal vert en premier. C'est le canal qui comporte le plus de détails de hautes fréquences a fortiori dans les zones de transition entre différents aplats de couleur ou de textures de l'image. On utilise ensuite les informations de ce canal pour interpoler les canaux rouge et bleu ce qui rend critique la bonne exploitation de la corrélation spatiale. On constate aussi (voir figure 2.11) que les méthodes qui interpolent le canal vert uniquement grâce aux informations de pixels verts du voisinage sont moins bonnes que les autres. On doit améliorer l'interpolation du canal vert avec les canaux rouge et bleu. Pour avoir les meilleurs résultats possible, on doit s'appuyer sur la corrélation spatiale et la corrélation spectrale.

⁵² KIMMEL R., *Demosaicing : image reconstruction from color CCD samples*, IEEE Transactions on Image Processing, vol. 8, n° 9, p. 1221-1228, septembre 1999.

⁵³ LUKAC R., PLATANOTIS K. N., *Universal demosaicking for imaging pipelines with an RGB color filter array*, Pattern Recognition, vol. 38, p. 2208-2212, avril 2005.

2.3) Méthodes par analyse fréquentielle

Une autre approche est celle par analyse fréquentielle. Ce type de méthode est notamment travaillé par D. Alleysson⁵⁴ L'idée est d'interpréter l'image non dématriciée comme la somme d'un signal de luminance et de deux signaux de chrominance modulés en hautes fréquences grâce aux transformées de Fourier. Nous pouvons alors représenter au sein d'un même graphique la transformée de Fourier des trois composantes couleur d'une image produite par un capteur (figure 2.9). Cette représentation comporte neuf régions, chacune des régions correspondant à la luminance ou la chrominance : le cercle du centre (L) représente la luminance et ceux des bords (C1, C2a, C2b) la chrominance. Ici, la luminance n'est pas associée au canal vert et la chrominance n'est pas associée non plus aux canaux rouge et bleu comme le propose les travaux de Bayer. Voici comment sont définis la luminance et la chrominance dans ce cas :

$$f^L = \frac{1}{4}f^R + \frac{1}{2}f^V + \frac{1}{4}f^B$$

$$f^{C1} = -\frac{1}{4}f^R + \frac{1}{2}f^V - \frac{1}{4}f^B$$

$$f^{C2} = -\frac{1}{4}f^R + \frac{1}{4}f^B$$

Avec f^R , f^V et f^B les fréquences correspondantes aux canaux rouge, vert et bleu.

⁵⁴ ALLEYSSON D. et al, *Linear Demosaicing inspired by the Human Visual System*, IEEE Transactions on Image Processing, vol. 14, n° 4, avril 2004.

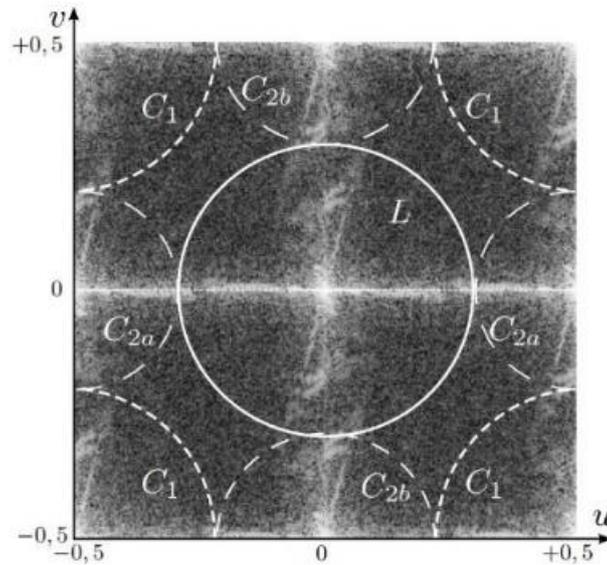


Figure 2.9 Répartition dans le plan fréquentiel de l'énergie normalisée d'une image⁵⁵. Fréquences en cycles par pixel.

À partir de cette représentation, il faut établir des filtres (figure 2.10) pour séparer au mieux les basses des hautes fréquences afin d'estimer au mieux la luminance et la chrominance. Il est à noter que les spectres des fréquences de luminance et de chrominance se recouvrent et donc le choix de filtre se fait forcément sous forme de compromis. Il y aura forcément des défauts de couleurs créés. On peut voir dans la figure 2.10 un exemple de filtre proposé par Alleysson et al.

⁵⁵ O. LOSSON et al, *Comparison of color dimesaicing methods*, Advances in Imaging and Electron Physics, Elsevier, 2010, 162.

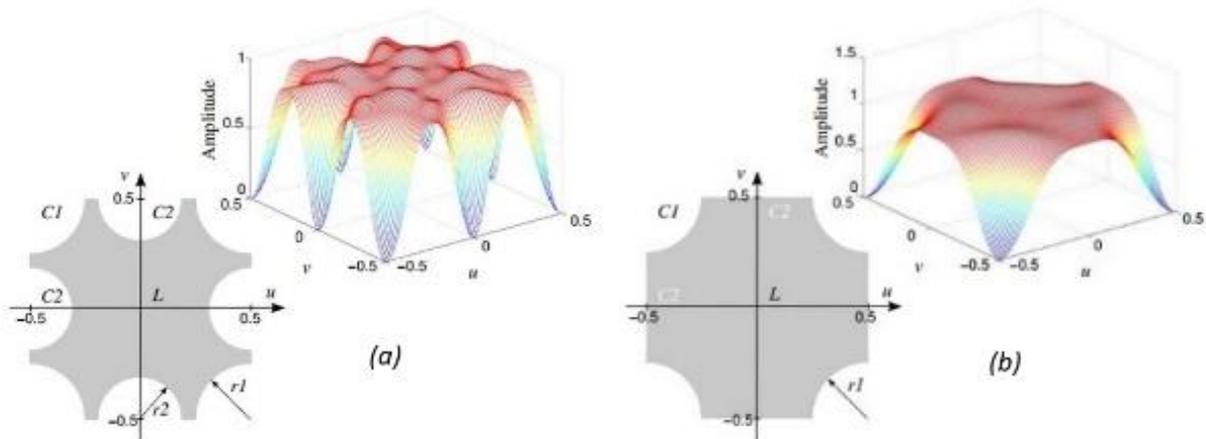


Figure 2.10 Filtres (bande passante et spectre) proposés par Alleysson(a) et Lian (b)⁵⁶.

D'autres propositions de filtres comme celles de E. Dubois mettent en avant une gestion du recouvrement des chrominances et des plus hautes fréquences de la luminance en pondérant plus les sous composantes C2a et C2b (voir figure 2.9) car le recouvrement est plus prononcé dans les directions horizontales et verticales.

N. Lian propose une méthode hybride entre analyse spatiale et analyse fréquentielle en partant de la constatation que la méthode proposée par Alleysson n'est pas optimale pour estimer la luminance. Lian, comme Dubois, propose un filtre qui réduit la part de la chrominance au profit de l'estimation de la luminance (figure 2.10). Il va ensuite proposer d'estimer la partie de chrominance négligée à l'aide d'une méthode spatiale basée sur la constance de la différence des composantes (corrélation spectrale) et une interpolation à pondération adaptative (corrélation spatiale).

⁵⁶O. LOSSON et al, *Comparison of color demosaicing methods*, Advances in Imaging and Electron Physics, Elsevier, 2010, 162.

2.4) Post-traitements

Les algorithmes de démosaïquage tels que ceux présentés produisent toujours des erreurs dans leurs résultats. Ils intègrent alors des post traitements pour minimiser les conséquences de ces erreurs. Voici quelques post-traitements effectués dans les algorithmes présentés précédemment.

Le principe de correction le plus répandu est de renforcer la corrélation spatiale au sein des images. Une méthode souvent utilisée qui servait auparavant à réduire le bruit dans des images noir et blanc est l'utilisation d'un filtre médian. Cela permet de réduire les fausses couleurs en gardant les variations locales de l'image. W.T. Freeman⁵⁷ l'a utilisé sur l'estimation des différences de composantes R-V et B-V pour améliorer l'estimation de la méthode bilinéaire. D'autres l'ont également utilisé avec pour principe de détecter au préalable les zones de l'image comportant des artefacts pour appliquer le filtre seulement dans ces zones.

⁵⁷ W.T. FREEMAN, « Median filter for reconstructing missing color samples », U.S. patent 4,724,395, décembre 1988

C) ÉVALUATION DES ALGORITHMES

1) Méthode d'évaluation et critères

1.1) Mise en place de protocoles

Pour évaluer les performances et la qualité du rendu des algorithmes de démosaïquage, il faut d'abord réussir à établir un panel de tests cohérents. Il est possible d'avoir alors plusieurs démarches différentes (qui peuvent être complémentaires). On peut tenter d'évaluer l'image selon des critères objectifs ou subjectifs. Nous pouvons tenter de faire entrer les caractéristiques du système de vision humaine lors de l'évaluation. Enfin, il est possible de choisir d'utiliser une image de référence et de la comparer aux images démosaïquées...

La plupart des articles traitant du démosaïquage proposent une évaluation selon des critères objectifs se servant d'images de référence connues et comparées aux résultats des méthodes de démosaïquage déjà proposées. Les chercheurs utilisent alors une image de référence sur laquelle ils simulent l'utilisation d'un CFA de type Bayer et à partir de là utilisent leurs propres algorithmes de débayerisation. Cette simulation se base sur l'isolation d'une des trois composantes couleurs en un pixel donné de l'image et cela pour tous les pixels de l'image. Par conséquent, l'utilisation de différents filtres colorés pour la fabrication du CFA comme évoquée dans la partie 1 ne peut être prise en compte. Toutefois, cela est bien normal puisque le but est ici d'isoler l'étape de démosaïquage pour évaluer cette dernière.

1.2) Critères d'évaluation

Il existe plusieurs mesures objectives pour évaluer les performances d'un algorithme de démosaïquage. La littérature propose le plus souvent les trois critères suivants : l'erreur absolue moyenne, l'erreur quadratique moyenne et le rapport signal sur bruit pic-à-pic. Ces critères sont considérés comme classiques.

L'erreur absolue moyenne ou MAE pour Mean Absolute Error est la moyenne des valeurs absolues des écarts. Pour une image c'est donc la moyenne des écarts des canaux RVB pour chacun des pixels sélectionnés pour le calcul. Les valeurs pour la MAE varient entre 0 et 255 dans notre cas puisque nous analysons des images 8 bits par canal. Les valeurs les plus faibles sont donc un indicateur de meilleurs résultats de l'algorithme. Voici une expression proposée sur le site web de l'École Supérieure d'Électricité de Rennes⁵⁸ pour une évaluation de qualité entre une image source I (de taille M*N) et une image résultante \hat{I} (de même taille) :

$$MAE = \sum_i^N \sum_j^M |I_{i,j} - \hat{I}_{i,j}|$$

L'erreur quadratique moyenne ou MSE pour Mean Square Value est la moyenne arithmétique des carrés des écarts de valeur observés pour chaque canal R, V ou B de chaque pixel. Les valeurs de résultats sont comprises entre 0 et 255². Des valeurs plus faibles correspondent à un meilleur résultat de l'algorithme. Voici une expression proposée

⁵⁸ Évaluation de la qualité des images, École Supérieure d'Électricité de Rennes, 2012, [en ligne], <http://www.rennes.supelec.fr/ren/perso/jweiss/tv/perception/qualite.php>

sur le site web de l'École Supérieure d'Électricité de Rennes pour une évaluation de qualité entre une image source I (de taille $M*N$) et une image résultante \hat{I} (de même taille) :

$$MSE = \frac{1}{M * N} \sum_i^N \sum_j^M |I_{i,j} - \hat{I}_{i,j}|^2$$

Le rapport signal sur bruit pic à pic ou PSNR pour Peak Signal Noise Ratio est une expression qui découle de la MSE. Des valeurs plus élevées sont considérées meilleures. Le PSNR permet d'appliquer une échelle universelle, contrairement aux critères différents dont l'étendue des valeurs est directement liée à l'échantillonnage des images. L'échelle est en décibels. Voici une expression proposée sur le site web de l'École Supérieure d'Électricité de Rennes :

$$PSNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{L^2}{MSE} \right)$$

Avec L le nombre d'échelon de luminance (255 pour 8 Bits)

Il est à noter que ces critères s'appliquent dans un espace colorimétrique d'acquisition RGB. Ils ne sont pas toujours cohérents avec l'estimation visuelle que l'on se fait de la qualité des images car l'espace colorimétrique dans lequel se font les mesures n'est pas cohérent avec le système de vision humaine : un écart mesuré entre deux couleurs dans l'espace colorimétrique RGB ne correspond pas forcément à l'écart perçu par le système de vision humaine. Il existe des espaces de couleur dits quasi uniformes tel que le CIE $L^*a^*b^*$, dont l'expression permet une représentation des couleurs quasi uniforme par rapport au système de vision humaine. C'est-à-dire qu'un écart de couleur mesuré dans l'espace CIE $L^*a^*b^*$ correspond à un même écart perçu par le système de

vision humaine quelles que soient les deux couleurs mesurées. K.H. Chung et Y.H. Chan⁵⁹ proposent d'utiliser des mesures dans l'espace colorimétrique CIE L*a*b* pour que les mesures de qualité aient une meilleure corrélation avec la qualité d'image perçue par le système de vision humaine. On appelle ce type de mesure les critères de perception.

D'autres chercheurs⁶⁰ ont proposé de mesurer directement la quantité d'artefacts de démosaïquage par détection de ces derniers. On peut mesurer la quantité de blurring, d'effet zipper et de False color.

⁵⁹K.-H. Chung, et Y.-H Chan, *Color demosaicing using variance of color differences*, IEEE Transactions on Image Processing 15 (10), 2944–2955, 2006.

⁶⁰ P. Marziliano, et al, *Perceptual blur and ringing metrics: application to JPEG2000*, Signal Processing: Image Communication 19, 163–172, 2004.

W.Lu, et al, *Color filter array demosaicking: New method and performance measures*, IEEE Transactions on Image Processing 12 (10), 1194–1210, Oct. 2003.

Y.Yang et al, *Quality evaluation of color demosaicing according to image resolution*, Proceedings of the 3rd International Conference on Signal-Image Technology & Internet-based Systems (SITIS'07), Shanghai Jiaotong University, China, pp. 689–695, décembre 2007.

2) Évaluation des algorithmes présentés

2.1) Comparaison visuelle des algorithmes présentés

En se basant sur le travail d'O. Losson, ce paragraphe a pour but de présenter les résultats des mesures sur notre sélection d'algorithmes selon les trois critères sélectionnés.

Nous proposons d'abord de comparer visuellement les différences de rendu des algorithmes évoqués dans les paragraphes précédents. Nous pouvons voir dans la figure 2.11 la représentation d'une image tirée d'une base de données de Kodak démosaïquée par les algorithmes cités dans les paragraphes précédents.

Il est possible de se rendre compte dans cet exemple que chaque algorithme présente des artefacts de démosaïquage et que chaque fois qu'un auteur a présenté un raffinement dans l'algorithme par rapport aux méthodes similaires précédentes, on obtient un gain dans la qualité d'image. Nous pouvons aussi voir que les deux dernières méthodes présentées semblent donner les meilleurs résultats. Celles-ci se basent sur les principes de l'analyse fréquentielle et peut imaginer que ces principes permettent le meilleur compromis de qualité de démosaïquage.



Figure 2.11. Rendus de différents algorithmes de démosaïquage. (a) à (b) méthodes basiques, (c) à (f) méthodes d'analyse spatiale, (g) et (h) méthodes d'analyse fréquentielle⁶¹.

Dans le détail, nous pouvons noter dans la figure 2.11 la présence des différents artéfacts que l'on a déjà décrits dans la partie 2:

- Nous pouvons dire que toutes les méthodes amènent l'effet de blurring, visible sur toute l'image mais surtout dans la texture du mur. Ce défaut est particulièrement visible sur la méthode bilinéaire.

⁶¹ O. Losson et al, *Du capteur à l'image couleur*, Hermès, pp.151-184, 2012.

- L'effet de fermeture éclair (zipper effect) est aussi visible particulièrement sur les méthodes bilinéaires et par correction de teinte. Cela se remarque au niveau des battants de la fenêtre et du volet.
- L'effet de fausse couleur (false color) est aussi visible. Il touche toutes les méthodes de démosaïquage mais surtout les bilinéaires, correction par teinte et dans une moindre mesure celles de Cok, Kimmel et Lian. Il se remarque particulièrement au niveau du volet de la fenêtre (ou il se combine avec l'effet zipper) et aussi dans le coin supérieur gauche de la fenêtre.

2.2) Comparaison objective des algorithmes présentés

Nous reprenons les critères classiques pour comparer de manière objective les algorithmes présentés précédemment pour l'image de référence. Voici un tableau des résultats (figure 2.12) Les résultats sont classés par ordre du moins fidèle au plus fidèle selon les résultats de calculs de MAE.

Criterion	Bilinear	Cst. Hue	Hamilton	Wu	Cok	Kimmel	Dubois	Lian
<i>MAE</i>	7.329	5.655	2.629	2.607	3.986	3.077	2.022	1.975
<i>PSNR</i>	24.551	27.350	33.409	33.535	29.885	31.858	36.479	36.445

Figure 2.12. Mesures MAE, PSNR (en décibels) des images rendues par les algorithmes de démosaïquage⁶².

On constate que les méthodes bilinéaires et par correction de teinte sont de loin les moins fidèles et que les méthodes de Dubois et Lian sont les plus fidèles, ce qui confirme ce que l'on peut voir sur les images de la figure 2.11. Les calculs de MAE et PSNR ne classent

⁶² O. LOSSON et al, *Comparison of color domesaicing methods*, Advances in Imaging and Electron Physics, Elsevier, 2010, 162.

pas de la même manière les algorithmes et semblent privilégier différemment les effets de zipper et de false color. Cependant, cette constatation devrait s'accompagner de résultats de détections de défauts de démosaïquage pour qu'on puisse conclure sur la corrélation entre le classement donné par ces deux mesures et la réelle présence des défauts.

2.3) Cohérence pour un opérateur

Les différents types de mesures présentés lors des paragraphes précédents ne peuvent pas déterminer comment l'image sera au visionnage. Ce ne sont que des indicateurs qui permettent de se donner un ordre d'idée ou de comparer des algorithmes entre eux sur les mêmes images. Par conséquent, on serait tenté de dire que ce genre de mesures n'est pas utile à un chef opérateur. Pourtant bien d'autres caractéristiques sont déjà mesurées et comparées pour différencier les caméras et les capteurs. Il serait utile d'avoir un protocole de mesure et de calcul qui permette de différencier les autres outils de la chaîne de l'image numérique. Ainsi, pourquoi nous nous attardons autant sur les caractéristiques des capteurs CMOS telle que la quantité de bruit ou la qualité des couleurs utile lors des comparaisons de systèmes différents alors que l'étape de démosaïquage peut tout simplement faire ou défaire les données issues d'un capteur.

D'autre part, la mise en place d'un protocole de mesure fiable et reproductible permettrait de mettre fin au manque de transparence de l'industrie de l'image numérique concernant les traitements numériques opérés sur les données RAW issues d'un capteur. Plusieurs incidences sont envisageables :

- Pour le démosaïquage effectué dans le boîtier de caméra ou d'appareil photo : cela nous permettrait de pouvoir mieux identifier la qualité des traitements et aussi de mieux isoler la source de la qualité de l'image en différenciant mieux les qualités issues du capteur de celle issues du démosaïquage et d'autres traitements.

- Pour le démosaïquage effectué dans un logiciel en post production : On pourrait mettre le doigt sur les « performances » de démosaïquage des différents logiciels qui s’offrent à nous lors de la post production. Les améliorations itératives lors de mise à jour des logiciels seraient enfin tangibles.
- Dans un contexte de post production d’image de film en laboratoire numérique : on pourrait mettre en concurrence de manière plus cohérente les traitements proposés par différents laboratoires.

Il est fort probable que les acteurs de l’industrie de l’image numérique utilisent des protocoles avec les mêmes critères que ceux évoqués ici. Il est donc d’autant plus regrettable que l’utilisateur final n’ait pas accès à ces informations, qu’il n’y ait n’y aucune autre entité proposant ce genre de test (pourquoi pas l’équivalent d’une entreprise comme DXO⁶³) et que l’utilisateur n’ait pas d’outils lui permettant de faire des tests en regard de la qualité de démosaïquage, d’autant plus si l’utilisateur est un professionnel de l’image.

⁶³ DXO est une entreprise indépendante de mesure et classement de la qualité d’image produite par des systèmes à capteurs type bayer et par les objectifs.

PARTIE III : UTILISATION ET COMPARAISON D'ALGORITHMES DE
DÉMOSAÏQUAGE POUR PLUSIEURS CAMERAS

A) PANEL DE CAMERAS ET UTILISATION DES LOGICIELS DE DÉMOSAÏQUAGE

1) Contexte, choix de caméras et méthodologie

1.1) Contexte

Nous allons étudier dans cette partie les propositions de démosaïquage de différents fabricants pour leurs caméras. N'ayant pas accès au matériel, nous allons donc utiliser des fichiers RAW proposés sur les sites web des fabricants, ainsi que les logiciels que proposent les fabricants pour démosaïquer les images et un logiciel tiers. Pour ces raisons, la comparaison sera donc impossible entre le démosaïquage d'un fabricant à l'autre car les caméras et les plans proposés sont différents. Ainsi, ce sont plutôt des différences entre plusieurs démosaïquage proposés par un fabricant que l'on pourra observer.

D'une part, les images provenant dans chaque cas d'un capteur à filtre de bayer, nous ne pourrons pas effectuer de mesures telles que décrites dans la partie 2 car il nous faudrait une image de référence non soumise aux contraintes d'un CFA pour la comparer à l'image proposée à la fin du démosaïquage.

Enfin, les logiciels ne sont pas forcément transparents sur les opérations qu'ils effectuent sur les images. Notamment d'autres traitements destinés à améliorer l'image peuvent être intégrés et interférer avec ce que nous essayons d'observer.

1.2) Choix des caméras et logiciels

Nous avons à notre disposition des plans provenant de plusieurs caméras de cinéma :

- Arri: Alexa SXT.
- Red: Weapon 8k.
- Sony: F55.

Nous utilisons les logiciels fournis par les fabricants des caméras choisies, à savoir ARRIRAW 3.4.5.4⁶⁴ Converter pour les caméras Arri, RedCine-X 50.5⁶⁵, pour les caméras Red, Raw Viewer 3.1⁶⁶ pour les caméras Sony et le logiciel tiers Davinci Resolve 15⁶⁷ fourni par le fabricant BlackMagic. Ce dernier est intéressant à intégrer dans le panel, car il propose la plupart du temps de démosaïquer les fichiers avec une méthode du fabricant de la caméra et aussi sa propre méthode. Nous pourrions vérifier si le « rendu constructeur » est similaire entre les deux logiciels et voir les différences avec le rendu proposé par Resolve.

Les logiciels proposés par Arri, Red et Sony proposent de visualiser, développer, modifier sommairement et transcoder les rushes issus de leurs caméras respectives. Le logiciel Davinci Resolve est lui une suite complète qui permet en plus, le montage, l'étalonnage et d'autres fonctions dédiées au son et aux effets spéciaux.

⁶⁴ [En ligne] https://www.arri.com/camera/alexa/tools/arriraw_converter/

⁶⁵ [En ligne] <https://www.red.com/downloads/options?itemInternalId=16144>

⁶⁶ [En ligne] <https://www.sonycreativesoftware.com/fr/rawviewer>

⁶⁷ [En ligne] <https://www.blackmagicdesign.com/products/davinciresolve/>

1.3) Méthodologie

Nous utiliserons des rushes fournis sur les sites web des fabricants de caméra. Nous utiliserons les réglages de développement proposés dans les métadonnées (sensibilité iso, balance des blancs, compensation d'exposition) qui sont ceux de la prise de vue. Nous exporterons des images des plans au format DPX dans la définition originale utilisée lors la prise de vue. Nous regarderons en détail les images à un grossissement identique quelle que soit l'image.

Pour chacun des logiciels nous jouerons sur les paramètres correspondant au démosaïquage si le logiciel le permet et comparerons différents réglages de ces paramètres.

Voici le panel d'image choisi pour chaque caméra. Après examen du panel d'image qui nous était accessible, nous avons choisi des images qui comportent des détails de textures fines telles que des cheveux ou des tissus et des images qui proposent de forts contrastes.

2) Exploitation de fichiers RAW sur différents logiciels constructeurs et tiers

2.1) ARRIRAW Converter

Le logiciel ARRIRAW Converter se divise en trois fenêtres : Browse, View, Render. La fenêtre Browse (figure3.1) permet de d'aller chercher et sélectionner les clips que l'on veut convertir. La fenêtre view (figure3.2) permet de manipuler les images et de les visualiser. La fenêtre Render (figure3.3) permet d'exporter les clips et de choisir les réglages d'export.

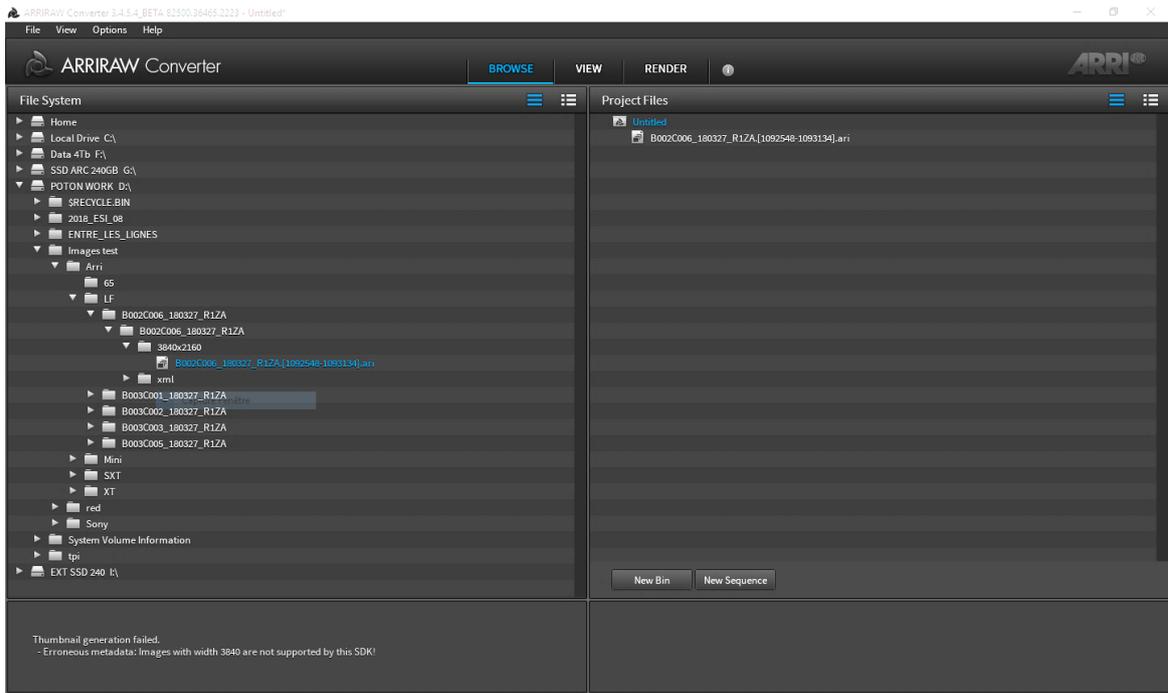


Figure 3.1. Capture d'écran de la fenêtre Browse du logiciel ARRIRAW Converter.

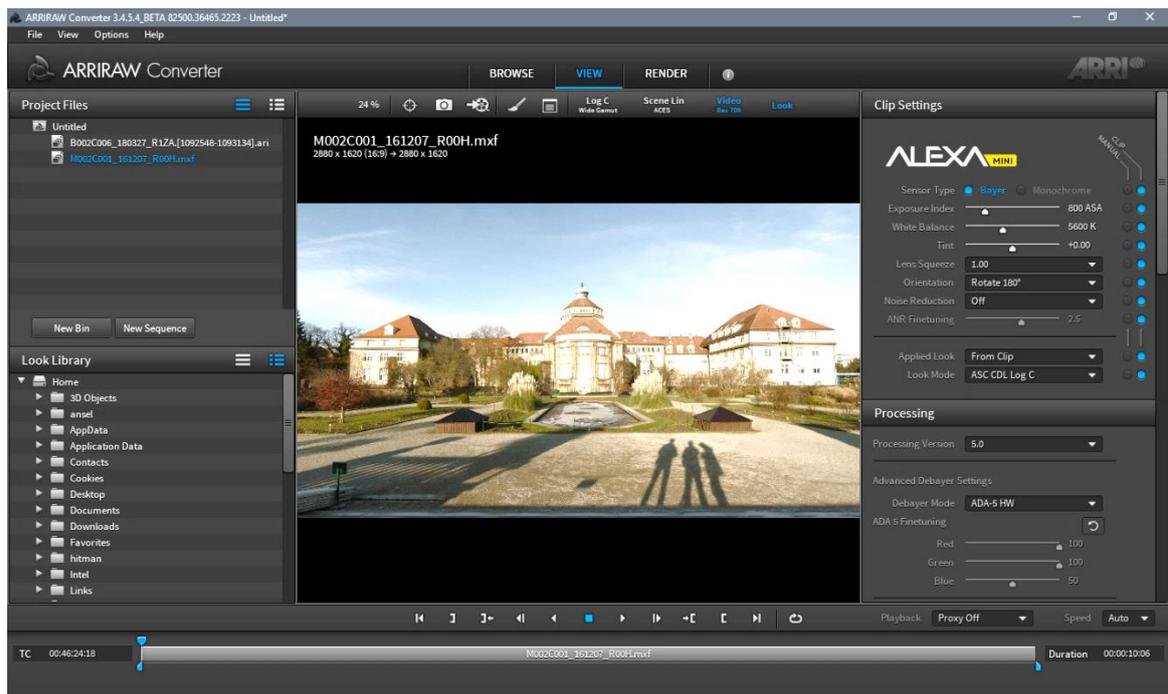


Figure 3.2. Capture d'écran de la fenêtre View du logiciel ARRIRAW Converter.

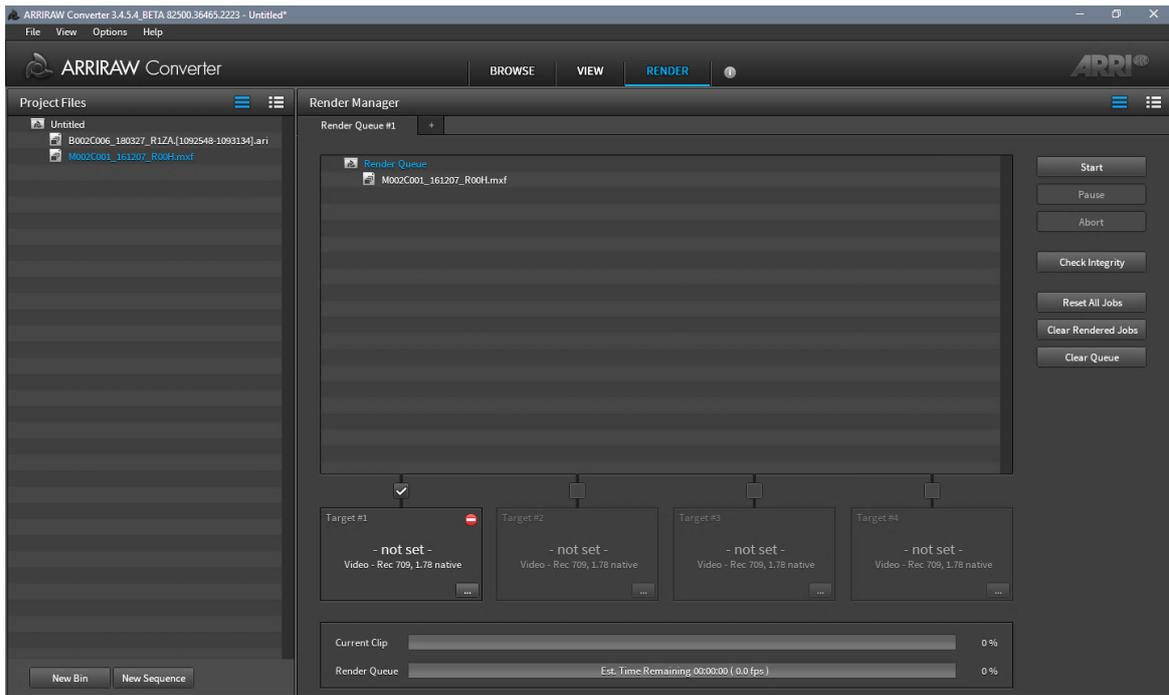


Figure 3.3. Capture d'écran de la fenêtre Render du logiciel ARRIRAW Converter.

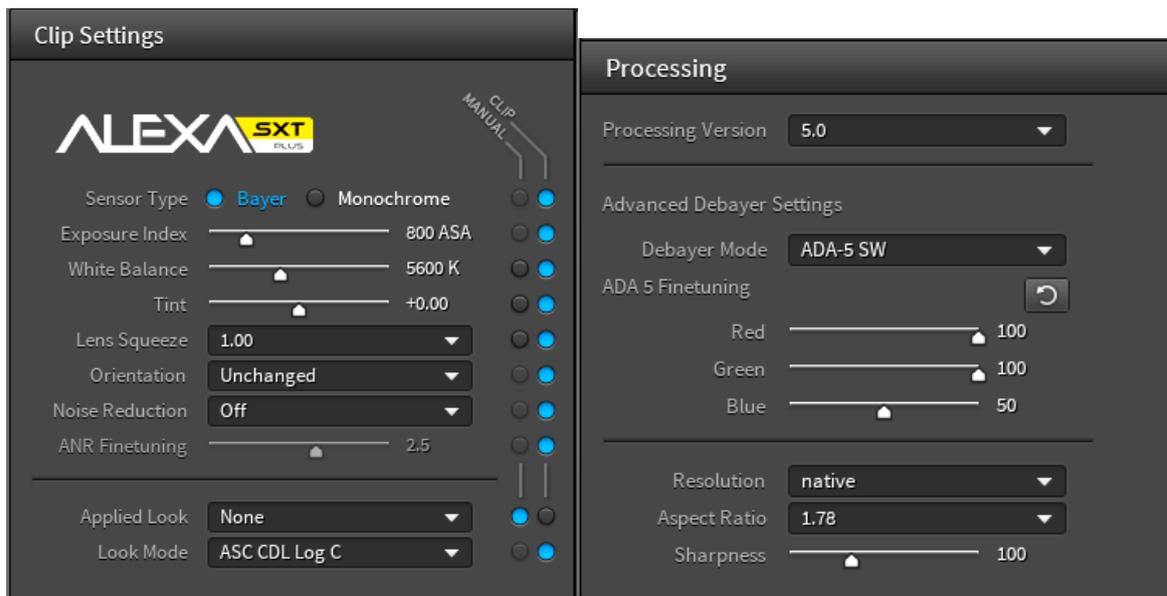


Figure 3.4. Onglets Clip Settings et Processing avec les réglages relatifs aux fichiers RAW Arri. L'onglet Processing concerne le démosaïquage en tant que tel.

Dans la fenêtre View les réglages relatifs au démosaïquage se trouvent dans l'onglet Processing (figure 3.4). On y retrouve plusieurs réglages :

- Processing version. Ce réglage influe sur le rendu des couleurs et du gamma, Il y a 5 réglages possibles. Le nombre le plus élevé correspond à la version la plus récente. Le choix du Processing version détermine les choix possibles dans Debayer mode (par exemple, en processing version 1, seul le Debayer mode 1 est disponible).
- Debayer mode. Ce réglage agit directement sur le démosaïquage des images. Il y a 6 réglages numérotés, le plus élevé étant le plus récent et théoriquement le plus qualitatif. D'autre part Certains modes proposent une version HW ou une version SW. La version HW est censée correspondre au démosaïquage que propose la caméra dans son boîtier quand on choisit un enregistrement des fichiers autre que RAW. La version SW est une proposition d'algorithme uniquement disponible en post production basée sur la version HW correspondante mais apportant des améliorations. Il faut noter que toutes les versions ne sont pas proposées pour toutes les caméras. Seule la version la plus récente est proposée pour les caméras plus récentes.
- Trois réglages à curseurs permettent de modifier la façon dont chaque canal R, V ou B est traité par l'algorithme. Cette option doit être activée dans les paramètres du logiciel.
- Résolution. Ce paramètre configure la définition d'affichage de l'image.
- Aspect ratio. Ce réglage permet de changer le ratio d'image pour, par exemple, désanamorphoser l'image provenant d'un objectif anamorphique.
- Sharpness. Réglage de la netteté. Ce réglage ne semble pas être une simple accentuation des contours, mais un traitement avancé qui intervient pendant le démosaïquage en jouant probablement sur la largeur des filtres employés.

Il faut noter que ces réglages n'influent que sur le visionnage des plans dans la fenêtre View. Tous les réglages de cette fenêtre sont aussi accessibles dans la fenêtre Render pour cette fois ci les appliquer réellement aux fichiers lors de l'export.

2.2) RED CINE-X

Le logiciel Red Cine-X propose une organisation similaire à celle d'Arriraw Converter. Le logiciel est séparé en deux fenêtres : Edit (figure 3.4) qui regroupe la navigation de fichiers, une timeline, la lecture et la manipulation des plans. La fenêtre Export (figure 3.5) permet d'exporter les clips.

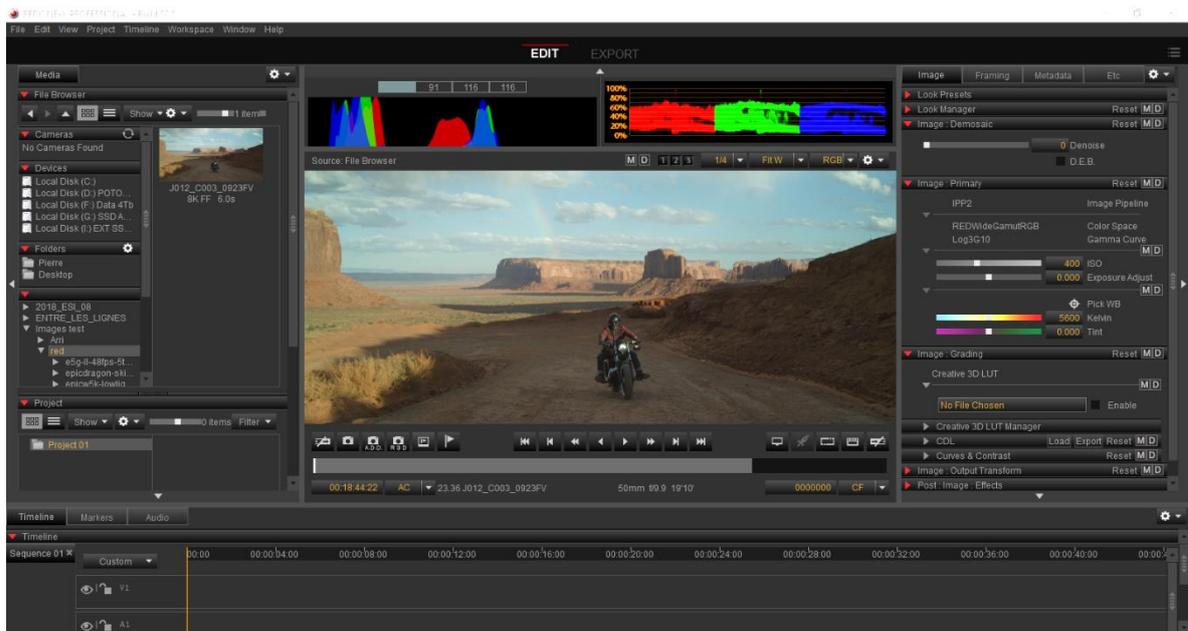


Figure 3.5. Capture d'écran de la fenêtre Edit du logiciel Red Cine X.



Figure 3.6. Capture d'écran de la fenêtre Export du logiciel Red Cine X.

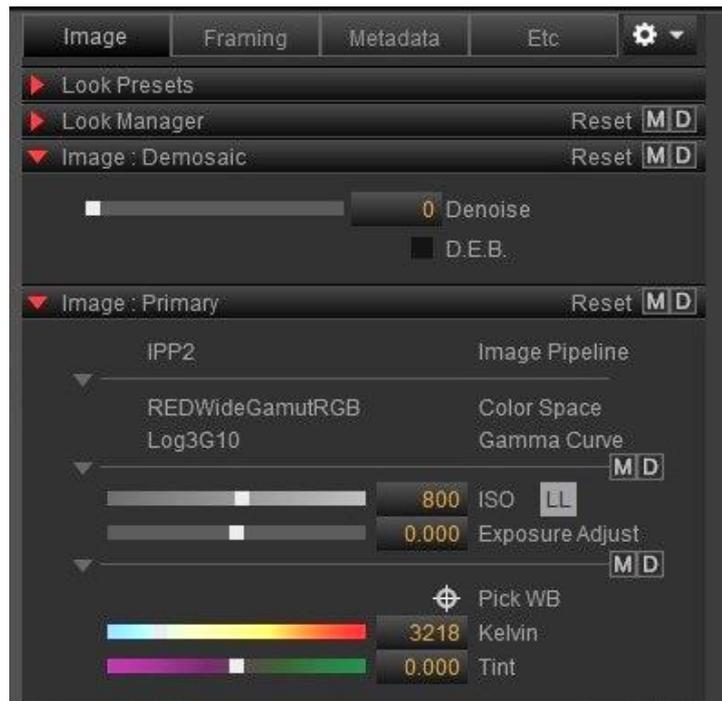


Figure 3.7. Outils relatifs à la gestion des fichiers RAW Red.

Dans la fenêtre Edit les réglages relatifs au démosaïquage se trouvent dans l'onglet Image : Demosaic. On y retrouve assez peu de réglages :

- Denoise. Un curseur permet d'appliquer une technique de réduction de bruit. Elle semble influencer sur la corrélation de teinte pour réduire la présence de bruit dans les trois canaux de couleur.
- D.E.B. (Dragon Enhanced Blacks). Cette option semble proposer une réduction du bruit coloré sans perte de qualité dans l'image.

Le fait que le logiciel propose une réduction de bruit dans l'onglet Demosaic semble indiquer que la réduction de bruit se fait effectivement lors du démosaïquage. Contrairement à Arriraw Converter, les réglages d'un plan dans la fenêtre Edit sont ceux qui sont repris dans la fenêtre Export.

On peut noter que la visualisation des plans peut se faire à la définition originale des plans ou $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$, ou $\frac{1}{16}$, qui intervient directement dans le nombre d'échantillons de l'image pris en compte lors du dématricage pour la visualisation.

2.3) Raw Viewer

Raw Viewer de Sony propose l'intégralité de ses fonctions dans une seule fenêtre (figure 3.8).

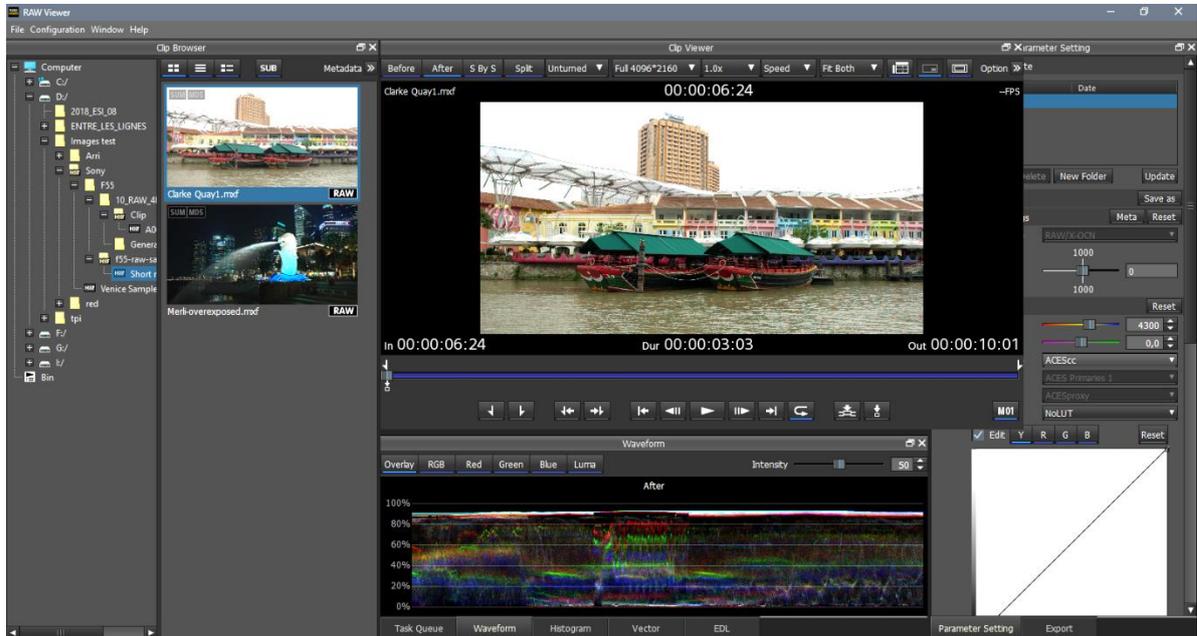


Figure 3.8. Capture d'écran de la fenêtre principale du logiciel Raw Viewer.

Raw Viewer est simpliste par rapport aux autres logiciels. Il ne propose aucun réglage propre au démosaïquage. Cependant, on pourra comparer son rendu avec le rendu « sony » du logiciel Davinci resolve.

2.4) Davinci Resolve

Le logiciel Resolve s'organise en plusieurs fenêtres. La fenêtre MEDIA permet de gérer les fichiers du projet (figure 3.9). La fenêtre Edit propose les outils d'un logiciel de montage avec une timeline. La fenêtre Color (figure 3.10) est dédiée à l'étalonnage. On retrouve les options relatives au démosaïquage dans cette fenêtre. La fenêtre Deliver permet l'export des plans (figure 3.11).

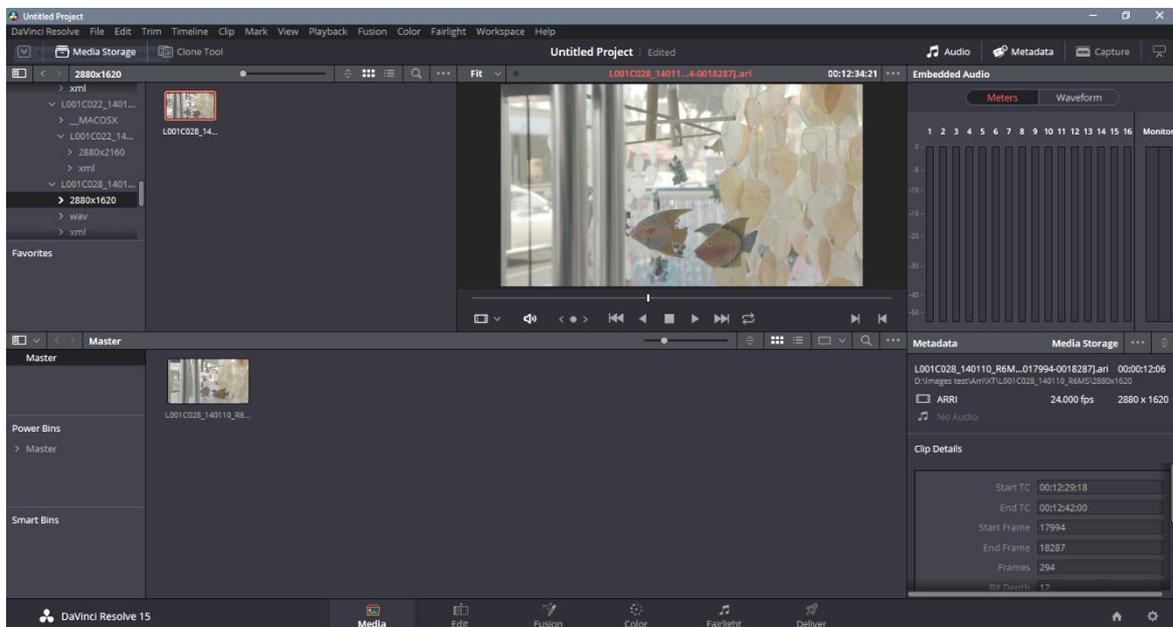


Figure 3.9. Capture d'écran de la fenêtre Media du logiciel Davinci Resolve.

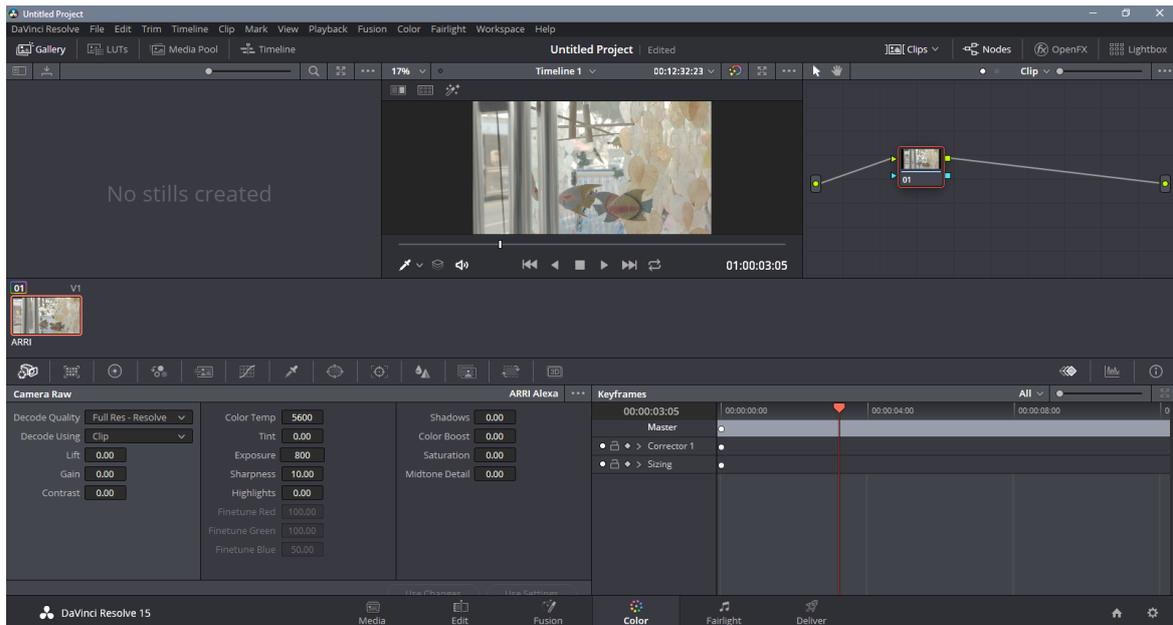


Figure 3.10. Capture d'écran de la fenêtre Color du logiciel Davinci Resolve.

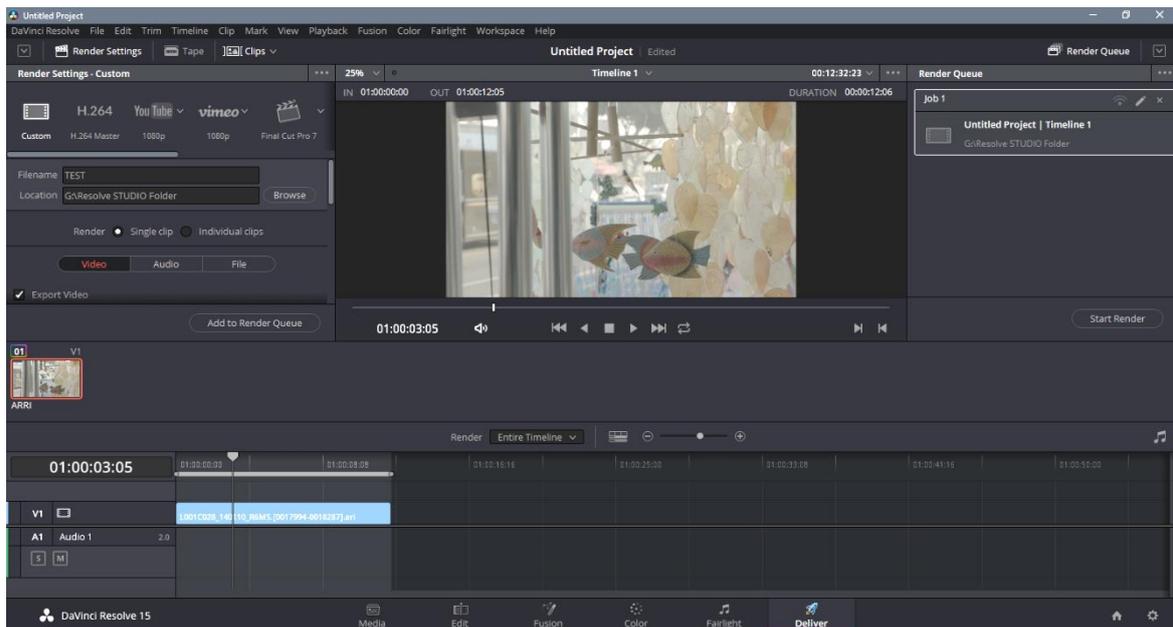


Figure 3.11. Capture d'écran de la fenêtre Deliver du logiciel Davinci Resolve.

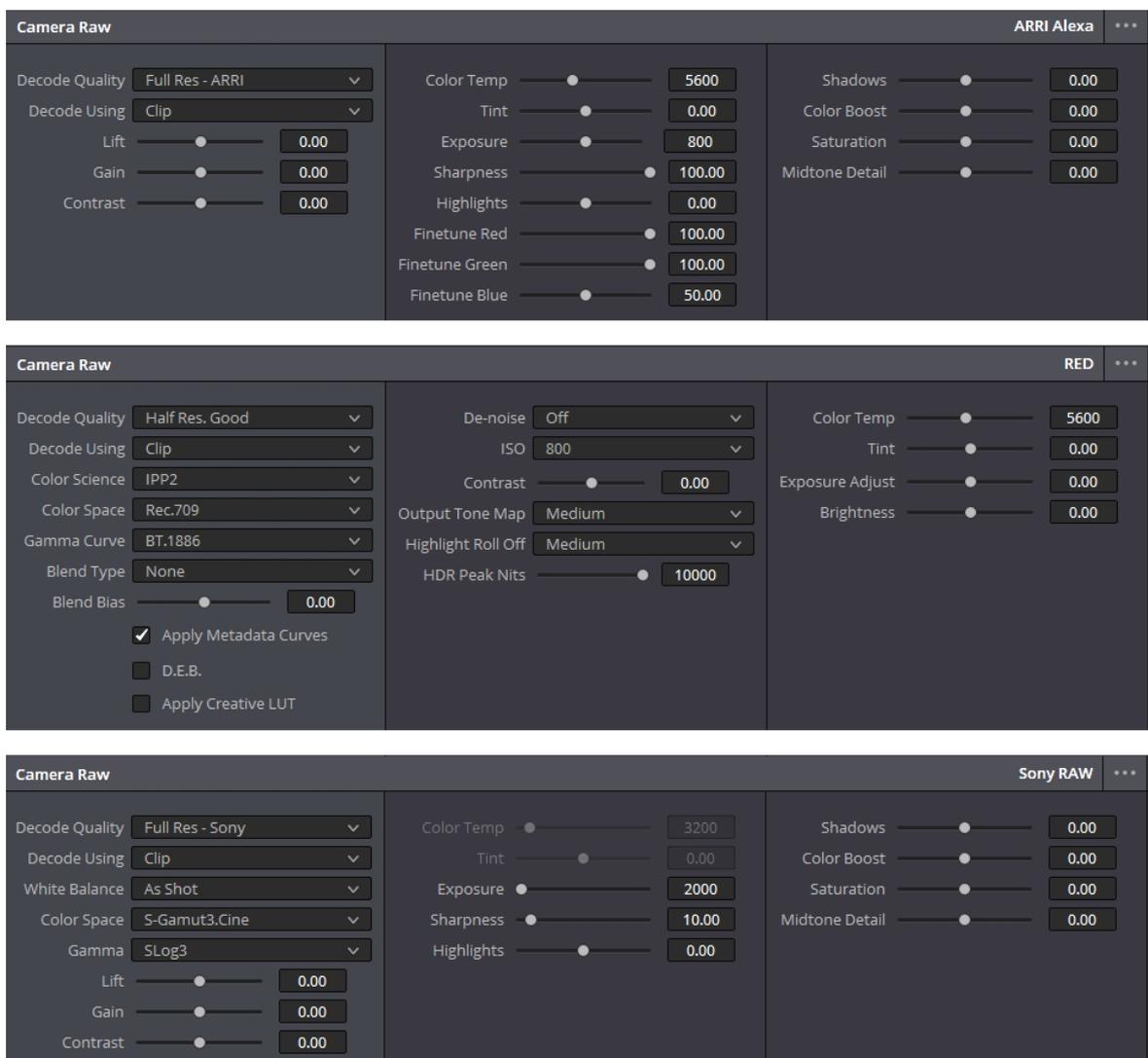


Figure 3.12. Outils relatifs à la gestion des fichiers RAW Arri, Red et Sony dans le logiciel Davinci Resolve.

Dans la fenêtre Color, les réglages relatifs au démosaïquage se trouvent dans l'onglet Camera Raw. Pour chaque type de fichier raw, les réglages diffèrent. On y retrouve assez peu de réglages qui touchent au démosaïquage :

- Pour des fichiers RAW Arri et RAW Sony, on peut voir que Resolve propose un démosaïquage développé en interne ou celui du fabricant, en définition originale jusqu'au

seizième de définition. Il faut noter que pour les fichiers de chez Arri, on ne sait pas quelle version de Processing et Debayer Mode utilise la méthode « Arri » proposée dans le logiciel Resolve.

- Pour des fichiers RAW Red, le logiciel ne propose pas de démosaïquage interne ou constructeur, mais les réglages possibles sont identiques à ceux du logiciel de Red. On peut donc se dire qu'il reprend les algorithmes de Red. On retrouve les réglages relatifs au RAW et ceux de réduction de bruit comme dans le logiciel de Red.

- Pour tous les constructeurs, on retrouve néanmoins les réglages que chacun propose dans son propre logiciel.

3) Essais de démosaïquage, résultats et observations

3.1) Image de la caméra Alexa SXR



Figure 3.13. Image de référence pour la caméra Arri Alexa SXT

Nous pouvons comparer les différents rendus proposés par les logiciels Arriraw Converter et Davinci Resolve sur quelques zones de l'image de référence.

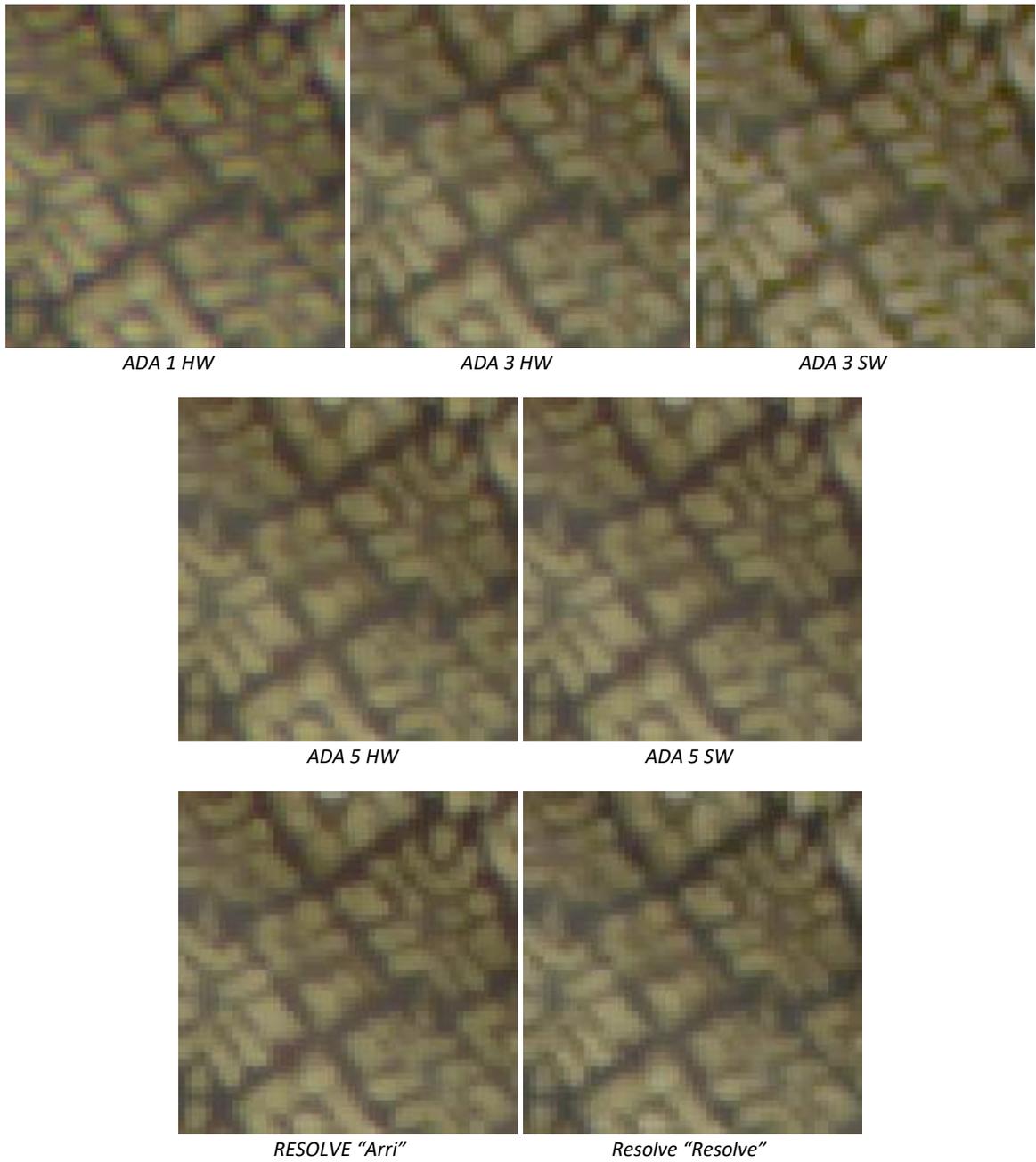


Figure 3.14. Rendu des détails selon plusieurs algorithmes d'une zone de l'image de référence.

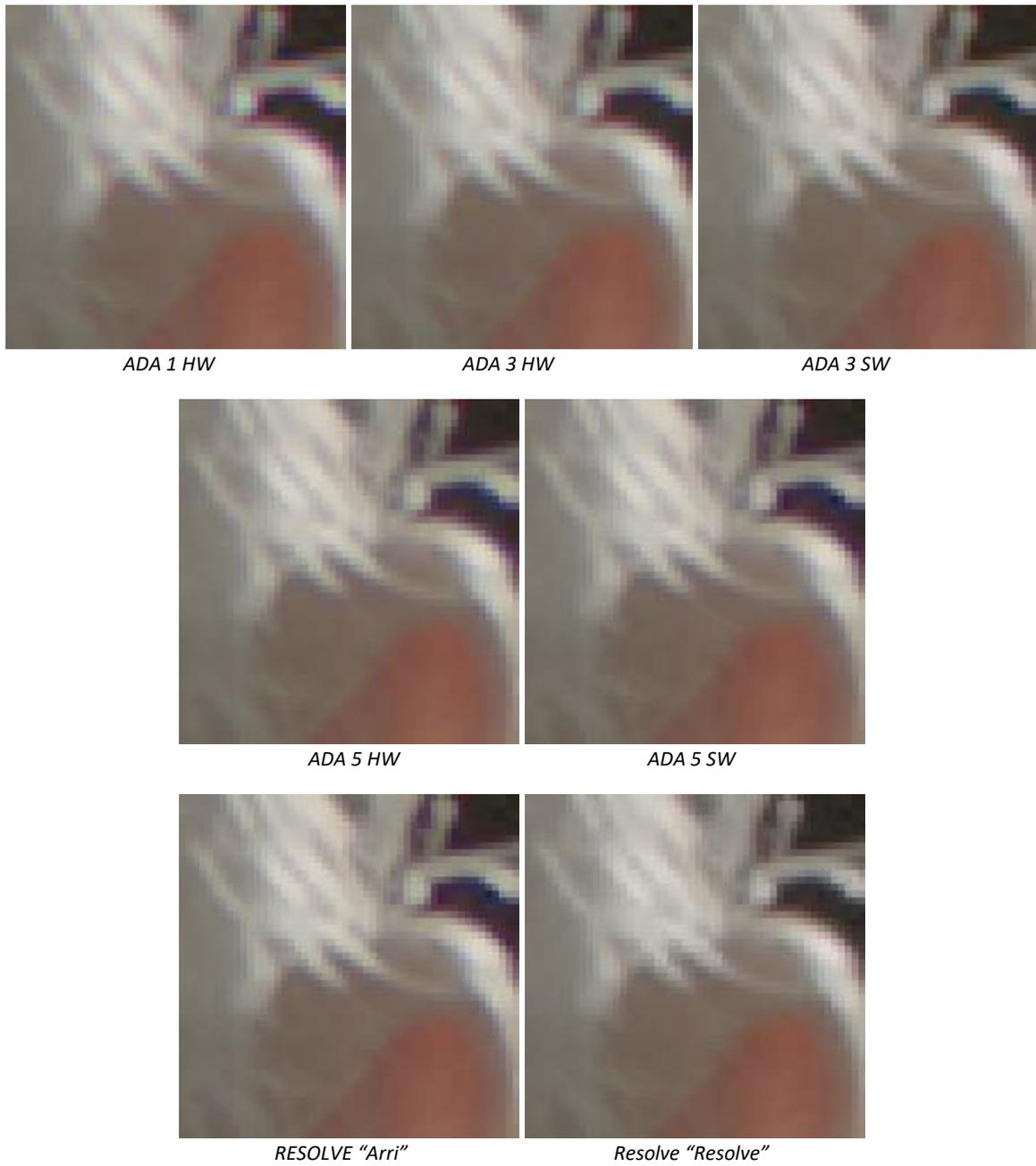


Figure 3.15. Rendu des détails selon plusieurs algorithmes d'une zone de l'image de référence.

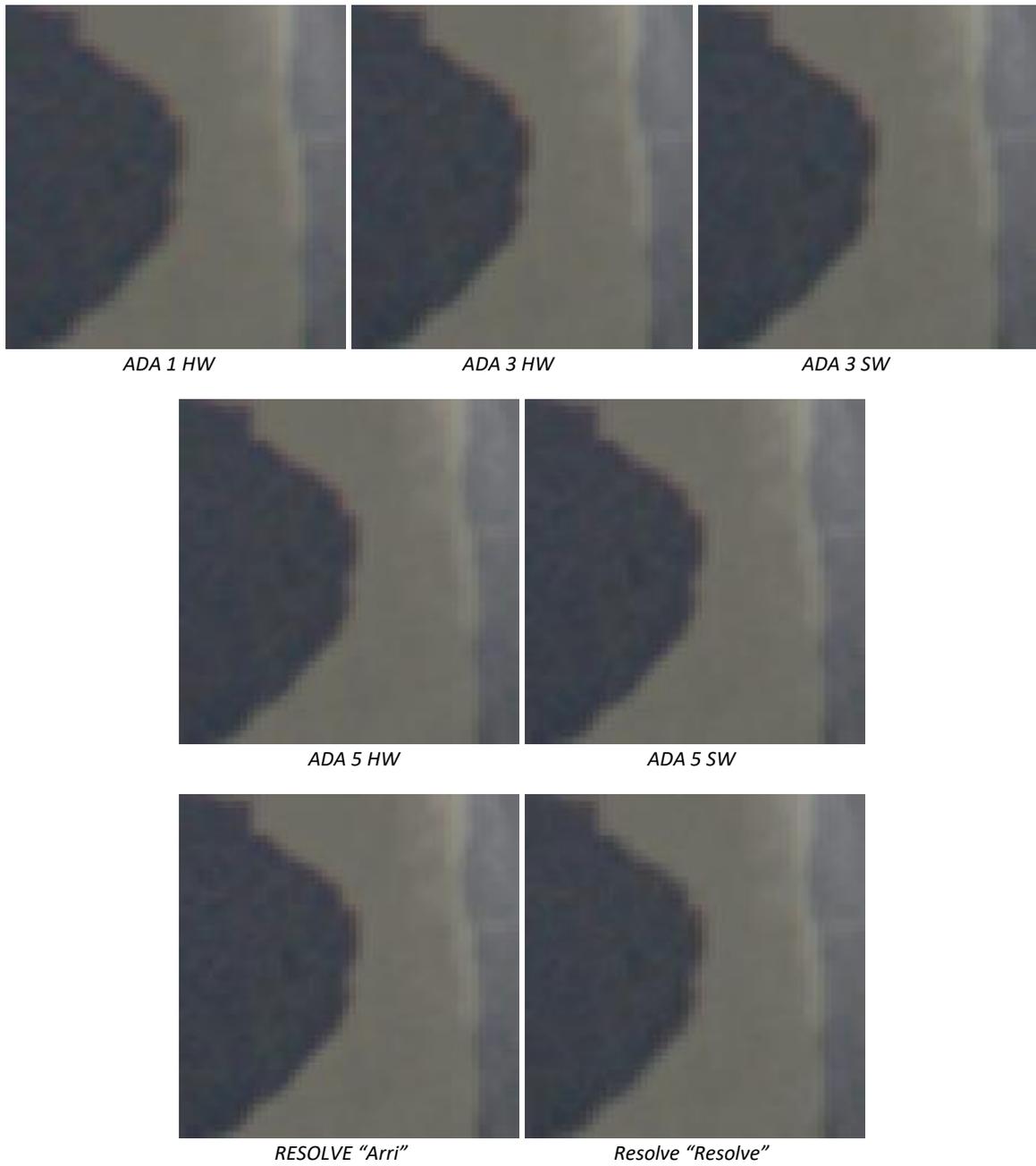


Figure 3.16. Rendu des détails selon plusieurs algorithmes d'une zone de l'image de référence.

Dans les figures 3.14 et 3.15 nous pouvons constater que le démosaïquage ADA 1 HW est le moins qualitatif. Il semble reprendre la méthode bilinéaire, de constante de teinte ou tout du moins une méthode par analyse spatiale peu performante. Néanmoins, dans certains cas, ce démosaïquage n'est pas toujours si éloigné d'autres démosaïquages plus performants, comme nous pouvons le voir dans la figure 3.16.

Le démosaïquage ADA 1 HW est celui qui génère le plus de défaut de fausses couleurs, cela est particulièrement visible dans les figures 3.14 et 3.15 qui proposent des motifs fins aux couleurs éloignées (figure 3.14) tels que des broderies ou des imprimés sur tissus et aussi des détails fins et contrastés (figure 3.15) comme des cheveux blancs sur fond noir.

Les démosaïquages ADA 3 HW jusqu'à ADA 5 SW proposent des améliorations successives et réduisent de plus en plus le défaut de fausses couleurs visible dans les figures 3.14 et 3.15. À chaque fois, la version SW d'un algorithme réduit légèrement les fausses couleurs par rapport à la version HW tout en semblant réduire très légèrement la netteté (défaut de blurring).

Les démosaïquages proposés par Resolve amènent à deux remarques particulières :

- Premièrement, le démosaïquage « Arri » proposé par Resolve n'est identique à aucun démosaïquage proposé dans Arriraw Converter. En effet le rendu « Arri » est très proche des rendus ADA 5 HW et ADA 5 SW sans être la copie conforme de l'un ou de l'autre. Le rendu semble être intermédiaire entre les deux, avec un léger défaut de fausses couleurs comme pour le ADA 5 HW (mais moins prononcé) et aussi un léger effet de lissage semblable au ADA 5 SW (toujours moins prononcé). Toutefois, ces observations sont tellement fines qu'il est impossible de voir la différence entre démosaïquages Resolve « Arri » et ADA 5 d'Arriraw Converter. Pour les observer, il faut regarder les détails des images sur un grand écran en superposant les 3 rendus.

- Deuxièmement, le démosaïquage « Resolve » proposé par Resolve semble le plus performant des trois cas proposés ici. Il présente le moins de défaut de fausses couleurs, pour un blurring le moins prononcé et ceux sur les trois détails d'image proposés.

Enfin, les détails proposés ici ne mettent pas en avant un effet de zipper. Il est aussi très difficile de pouvoir juger d'un effet de blurring puisque nous n'avons pas d'image de référence avant démosaïquage et, que les performances de l'optique utilisée lors de la prise de vue et les filtres passe bas présents sur le capteur produisent déjà un effet flou à l'échelle de quelques pixels.

3.2) Image de la caméra Sony F55



Figure 3.17. Image de référence pour la caméra Sony F55.

Nous pouvons comparer les différents rendus proposés par les logiciels Sony Raw Converter et Davinci Resolve sur quelques zones de l'image de référence.



Sony Raw Viewer



Resolve "Sony"



Resolve "Resolve"

Figure 3.18. Rendu des détails selon plusieurs algorithmes d'une zone de l'image de référence.

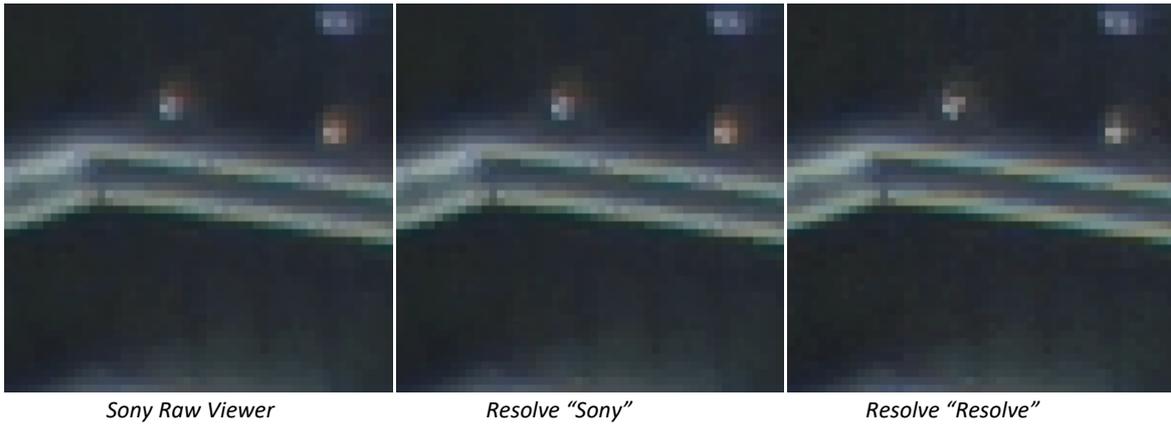


Figure 3.19. Rendu des détails selon plusieurs algorithmes d'une zone de l'image de référence.

Dans la figure 3.18, on peut constater que le rendu issu de Raw Converter propose le meilleur compromis, avec le moins d'erreurs d'interprétation en bord des signes lumineux. Le rendu Resolve « Sony » semble identique, mais on peut observer que les bords des signes lumineux sont un peu plus durs et accentuent les défauts visibles en bordure des signes lumineux (surtout dans les obliques comme sur le logo blanc et rouge et dans la lettre « C »). On peut interpréter ces erreurs comme un défaut semblable au défaut de fausses couleurs. On retrouve une structure similaire des contours, mais pas de pixels colorés. Néanmoins, les bords obliques contiennent des artefacts et le défaut de fausses couleurs décrit le mieux ces artefacts.

Dans la figure 3.19 il est presque impossible de différencier le rendu de démosaïquage Raw Viewer et Resolve « Sony ». Pourtant, en regardant les points lumineux au-dessus des lignes obliques, on peut voir que le rendu Resolve « Sony » semble accentuer plus fortement les transitions entre les pixels clairs et sombres.

Pour ce qui est du rendu de démosaïquage Resolve « Resolve », les artefacts sont beaucoup plus présents. Dans la figure 3.18, les obliques et bords des signes lumineux sont

bien plus marqués par des artefacts similaires au défaut de fausse couleur et l'on peut voir en quelque sorte la structure de Bayer du CFA à travers le démosaïquage. Dans la figure 3.19, un effet de fermeture éclair est visible sur les traits obliques et en même temps les deux points lumineux sont mieux définis et sont moins marqués par un effet de fausses couleurs.

D'autre part, les détails choisis n'étant pas au centre de l'image, on peut aussi assimiler des défauts de fausses couleurs à des aberrations chromatiques générées par l'optique à la prise de vue (points lumineux sur la figure 3.19). Cela n'empêche pas les algorithmes d'influer sur le rendu de ces aberrations.

3.3) Images de la caméra Red Weapon 8k

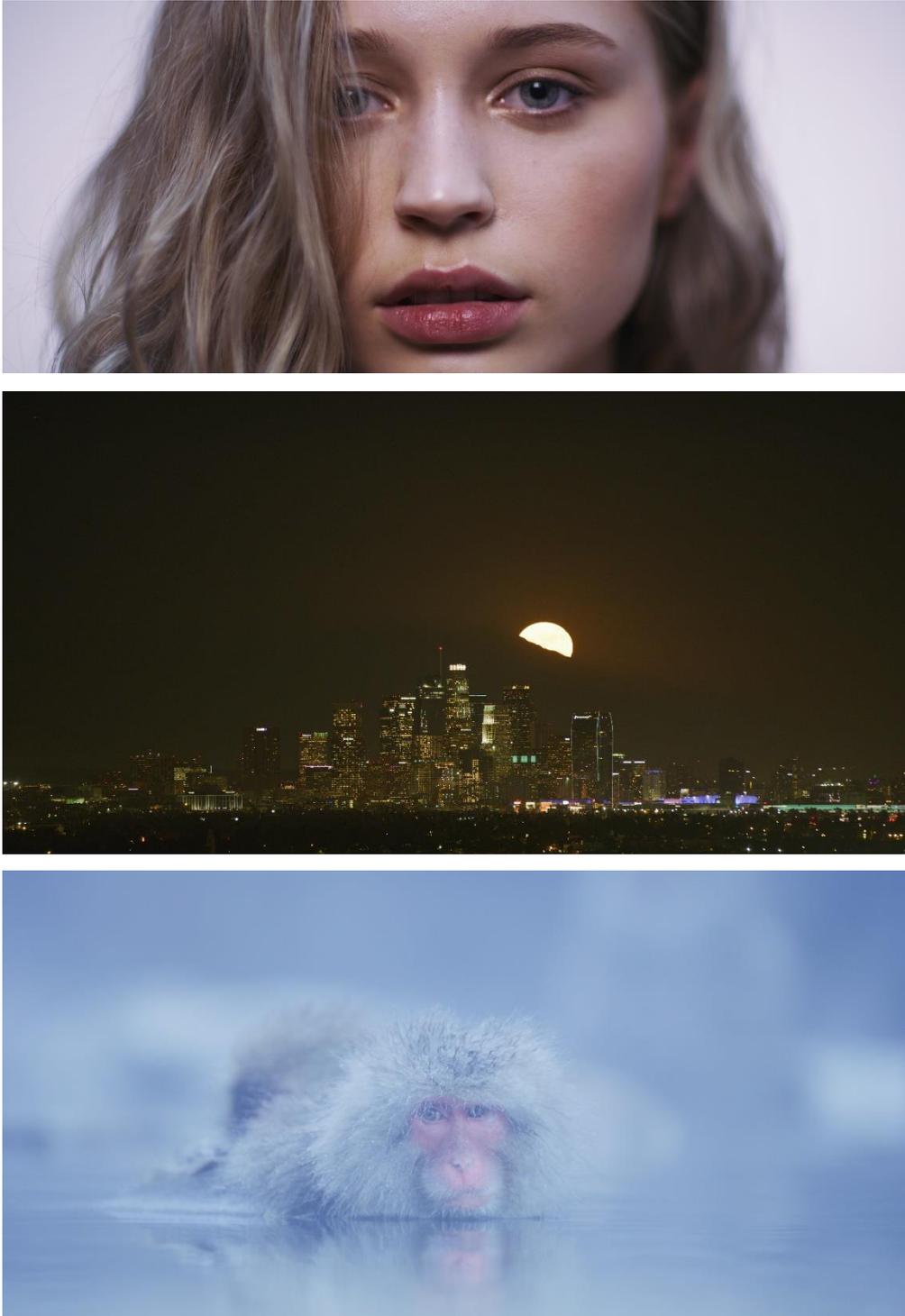


Figure 3.20. Images de référence pour la caméra Red Weapon 8k.

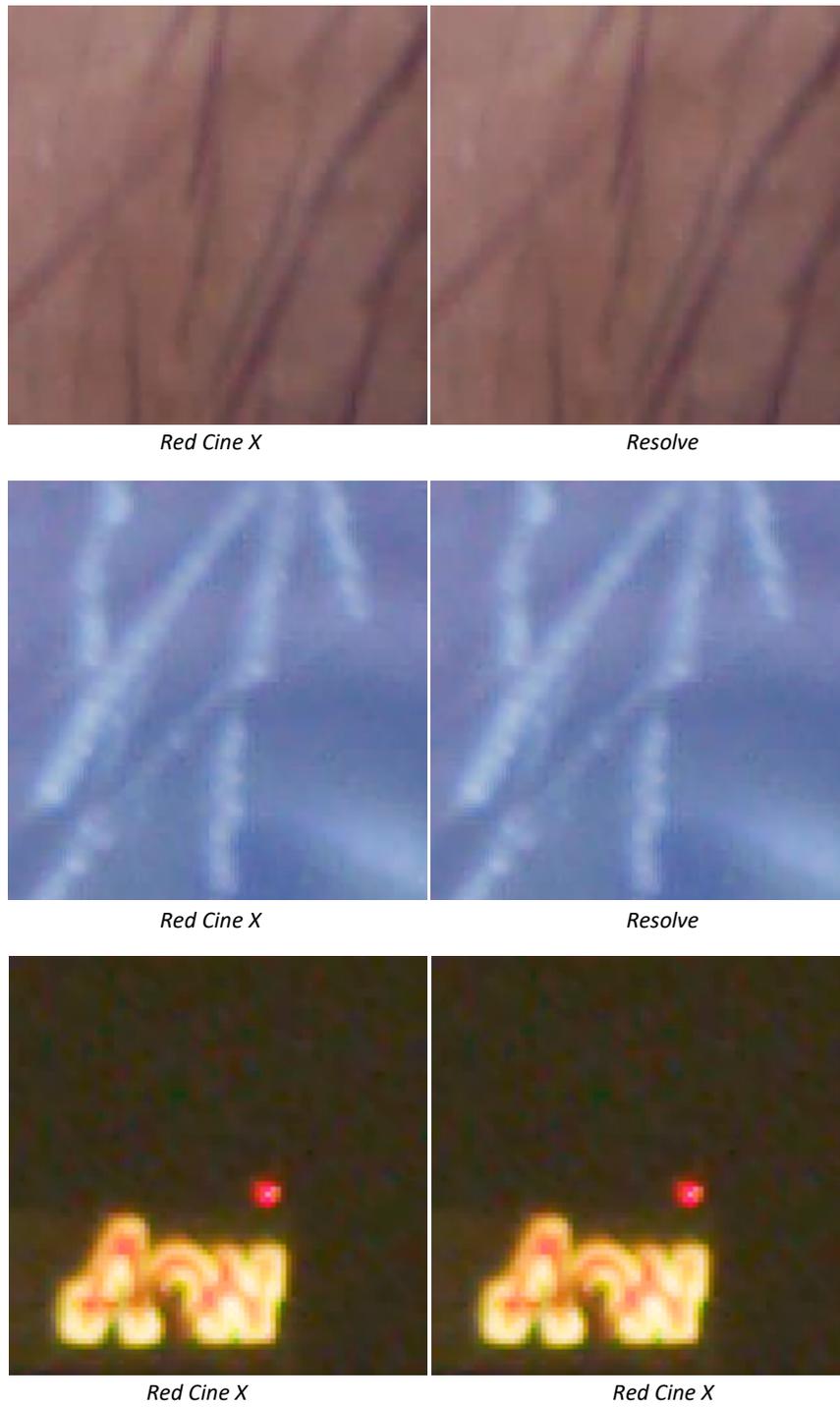


Figure 3.21. Rendu des détails selon plusieurs logiciels de zones des images de référence.

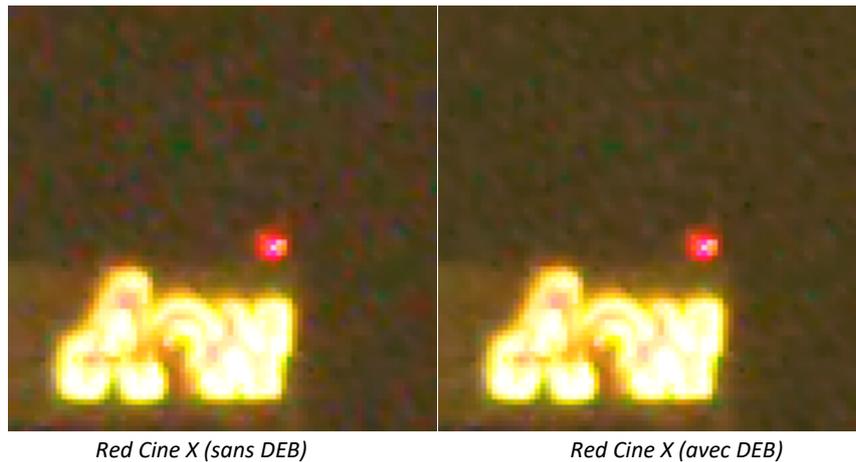


Figure 3.22. Rendu des détails avec et sans la réduction de bruit « DEB ». (niveaux de l'image modifié pour une meilleure lecture)

Dans le cas présent, on peut constater grâce à la figure 3.21 que les rendus de démosaïquage proposés par Red Cine X et Resolve sont identiques.

Néanmoins, la figure 3.22 montre l'influence de l'option de réduction de bruit D.E.B. accessible dans les deux logiciels. On constate qu'une infime quantité de bruit coloré est réduite. Ce traitement est assez peu visible sur une image fixe, mais est parfaitement remarquable dans un enchaînement d'image.

D'autre part, on peut voir que le format Raw compressé de chez Red induit des artefacts de compression et que globalement l'image semble bien moins propre (figure 3.21). Cependant, cette observation est à nuancer, car le capteur est en 8k ce qui est la résolution et définition de capteur la plus élevée du panel. Cela peut être la source de cette différence de qualité. D'autre part, comme la résolution de l'image est plus élevée que les standards de diffusion actuels, on peut aisément imaginer que ces défauts seront réduits lors d'une interpolation vers une résolution plus faible.

B) QUELQUES MOTS SUR LA PARTIE PRATIQUE DE MÉMOIRE

1) Le projet

Le projet de la partie pratique de ce mémoire est de mettre en défaut des couples capteur de bayer- algorithmes de démosaïquages. Aussi nous pourrons observer l'influence de ces défauts dans des cas de prise de vue réelle.

Compte tenu des observations et des recherches effectuées dans les trois parties, nous pouvons déterminer des prises de vue, qui théoriquement mettront en défaut un couple capteur de bayer- algorithme de démosaïquage.

Voici donc plusieurs sujets sur lesquels je souhaite travailler ma prise de vue :

- La qualité de la lumière. Nous testerons dans un 1^{er} temps des prises de vue « monochromatiques » ou s'en approchant avec différentes gélatines apposées sur les projecteurs. Nous testerons plusieurs types de sources afin de remarque d'éventuelles différences de rendu par les algorithmes de démosaïquage. Nous testerons aussi différentes températures de couleurs d'éclairage afin de voir si les réglages de gain des trois canaux de la caméra influent sur le travail des algorithmes.
- La prise de vue en cas de grands contrastes. Nous testerons des prises de vue en extérieurs par grand soleil pour voir mettre en évidence des défauts de démosaïquage en prise de vue réelle.
- La prise de vue de motifs fins. Nous regarderons si nous pouvons identifier de nouveaux défauts sur des motifs fins.

Nous pourrons nous référer également au dossier de la partie pratique du mémoire fourni en annexe.

2) Extraits et observations

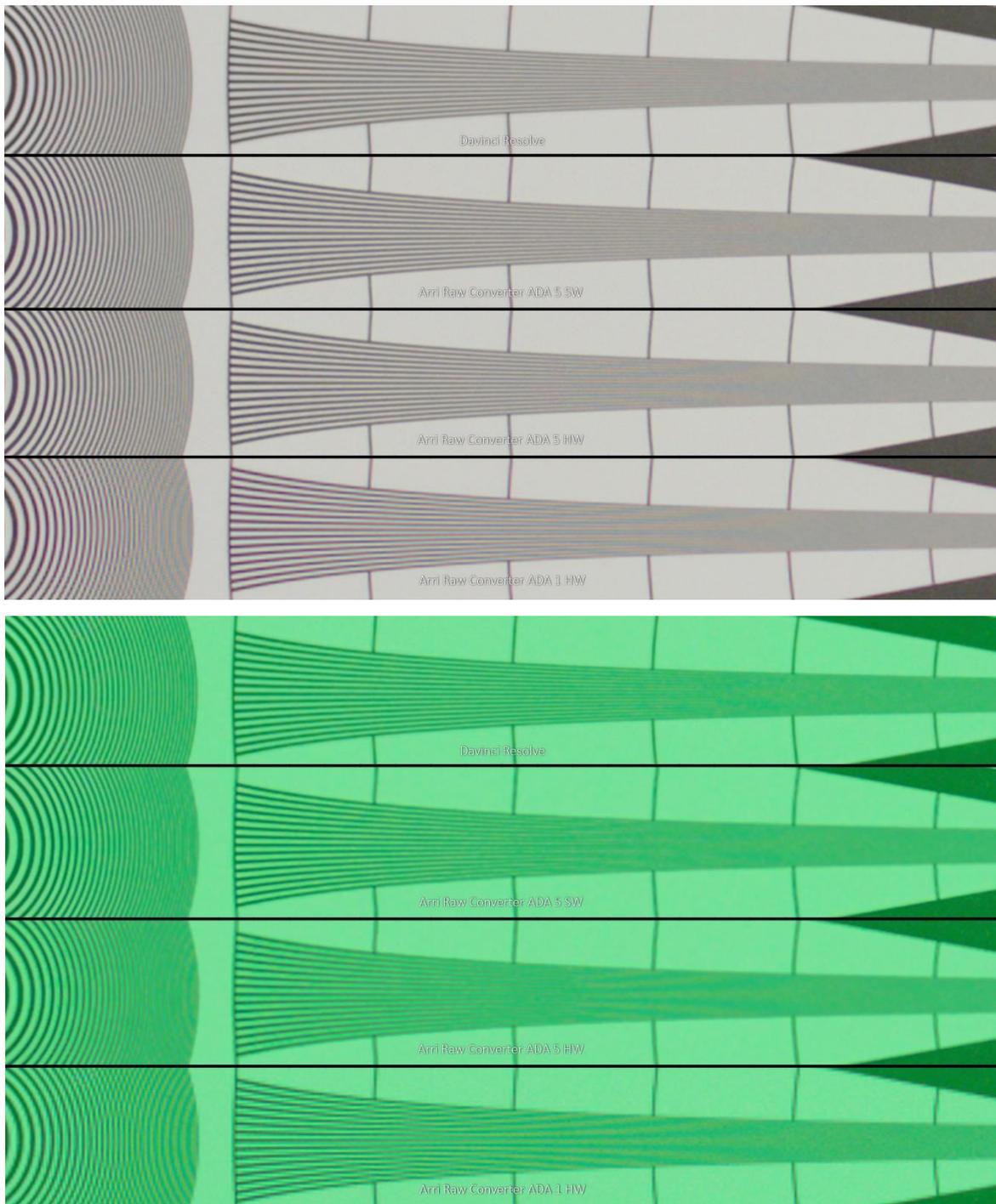


Figure 3.23. Rendu des détails d'une mire CZP par canal.

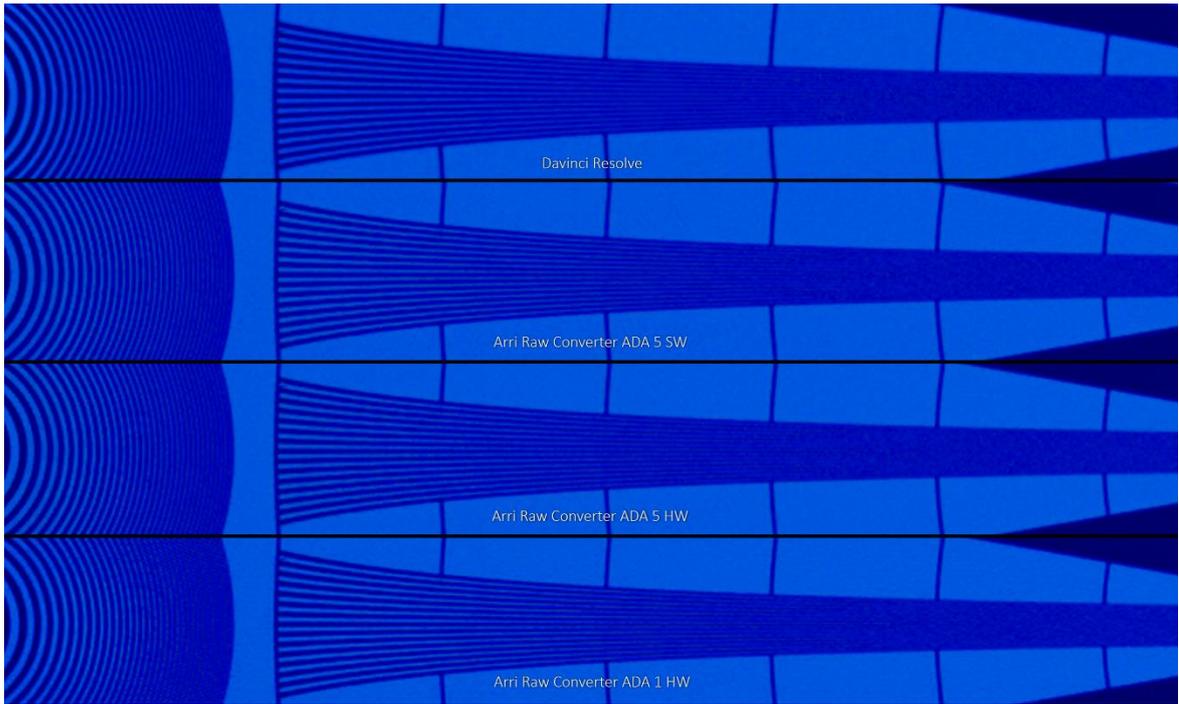


Figure 3.23 (suite). Rendu des détails d'une mire CZP sous différentes lumières.



Figure 3.24. Rendu des détails d'un visage sous différentes lumières.



Figure 3.24 (suite). Rendu des détails d'un visage sous différentes lumières.

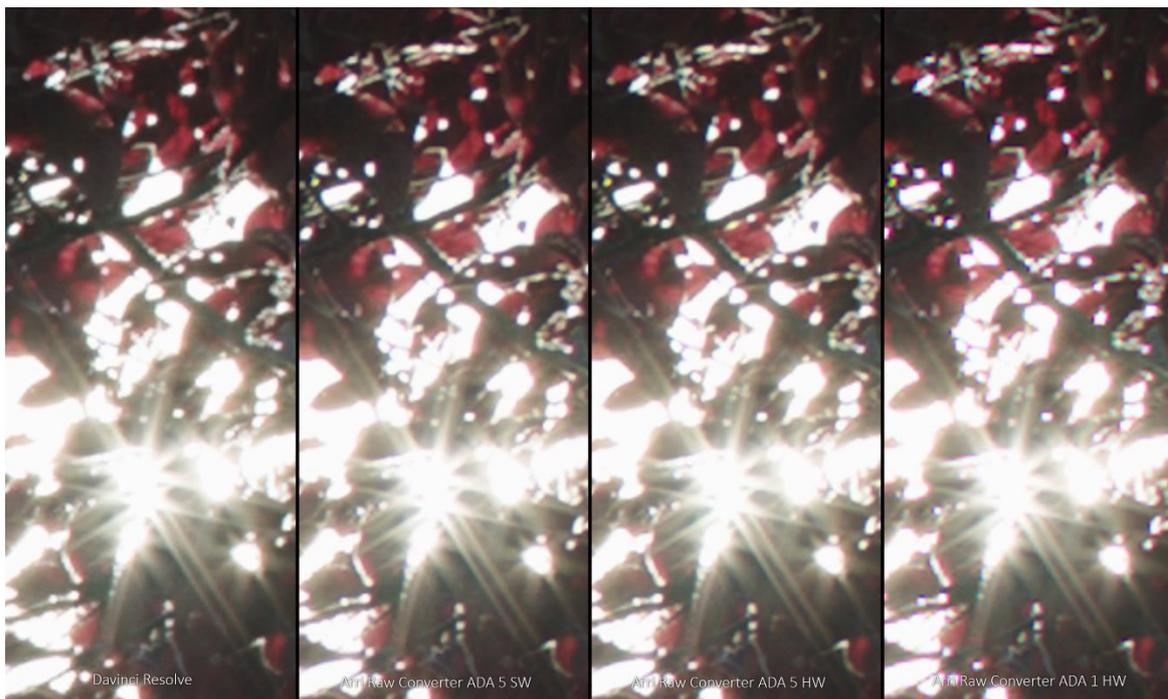


Figure 3.25. Rendu des détails d'un sujet à fort contraste et motifs fins.

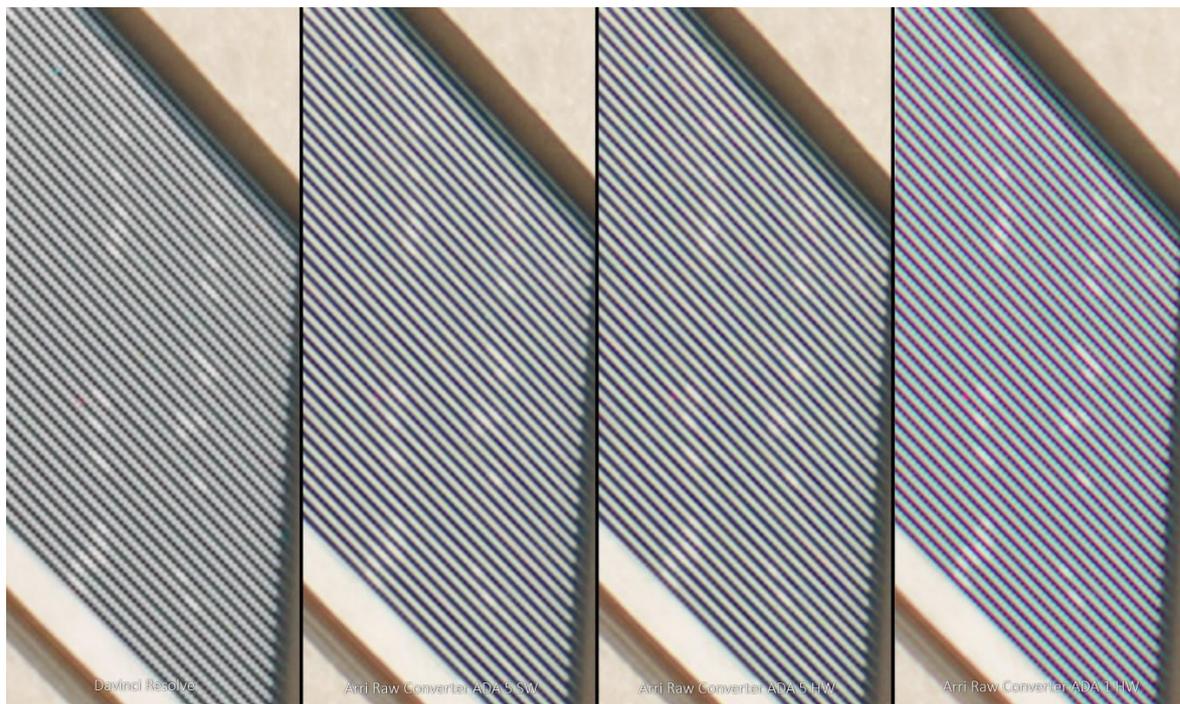


Figure 3.26. Rendu des détails d'un motif répétitif coloré.

Les figures 3.23 à 3.26 présentent une série d'extraits non exhaustive de la partie pratique de mémoire. Nous allons commenter succinctement ces extraits.

La figure 3.23 présente une mire de type CZP éclairée à l'aide de différentes lumières : lumière blanche, lumière verte, lumière bleue et lumière rouge pour plusieurs algorithmes. L'intérêt de ce test est de mettre en évidence l'interdépendance des trois canaux RVB pour la restitution du détail. En effet, lorsque l'on éclaire la mire avec une lumière bleue ou rouge, la perte de qualité dans la restitution des détails se fait ressentir fortement.

La figure 3.24 démontre encore cette différence en proposant une comparaison sur un visage entre un étalonnage qui isole le canal rouge, vert ou bleu dans une prise de vue

à la lumière blanche à 5600k (à gauche dans la figure) et une prise de vue où la lumière a directement été filtrée (à droite dans la figure). La différence bien que peu visible en format papier, se voit notamment avec les cheveux du modèle.

La figure 3.25 montre un sujet à fort contraste avec différents algorithmes. Le recadrage choisi est volontairement au bord droit du cadre original. Cette configuration a pour but de montrer qu'il est difficile de faire la différence dans certains cas entre des aberrations chromatiques de l'optique à la prise de vue, ou des effets de fausses couleurs au démosaïquage.

Enfin, la dernière figure (3.26) représente un motif répétitif fin et coloré. Cette situation a pour but de mettre en évidence une conséquence du dématricage : la grille semble ne pas avoir la même teinte selon les algorithmes utilisés. Cela peut être lié au défaut de fausses couleurs mais, pas seulement car, on constate que la teinte de la grille varie aussi entre des algorithmes ne présentant pas ce défaut de fausses couleurs.

CONCLUSION GÉNÉRALE DU MÉMOIRE

Nous avons dans un premier temps rappelé les origines des matrices de filtres colorés et des capteurs qui leur sont associés dans les caméras de cinéma actuelles. Dans un deuxième temps nous avons rappelé le fonctionnement général et les défauts des capteurs et les principes de conception des matrices de filtres colorés dont celle proposée par Bryce E. Bayer. Nous nous sommes rendu compte que le principe du filtre de Bayer utilisé quasi exclusivement dans toutes les caméras est déjà lui-même un compromis pour la reproduction du détail et des couleurs. On ne peut donc parler de filtre de Bayer et d'algorithmes de manière séparée. Il serait intéressant donc de regarder quelles autres matrices sont possibles et quels autres compromis elles induisent. Je pense notamment en plus des matrices citées en partie 1, aux matrices « X-trans » proposées par Fujifilm dans leurs appareils photos, aux capteurs Foveon proposés par Sigma, ou encore quelques idées encore au stade de recherche comme des capteurs avec des photosites dédiés à la captation de toutes les longueurs d'onde visibles chez Kodak par exemple. D'autre part, nous avons évoqué l'importance de la qualité des filtres employés pour la sélection des longueurs d'onde atteignant chaque photosite. Nous pourrions dédier le travail d'un mémoire entier à ce domaine pour comprendre et expliquer encore une fois l'infinité des compromis possibles à ce niveau. Il serait par exemple intéressant de comprendre la relation compliquée entre la qualité de rendu des couleurs et du détail et le recouvrement des spectres des filtres RVB employés sur le capteur. Nous avons aussi succinctement évoqué la difficulté de ne voir seulement la restitution du détail induite par le dématricage et que bien d'autres interpolations se font pour observer une image. En effet, si le dématricage est le sujet de ce mémoire, on pourrait presque poser les mêmes questions pour tout type d'interpolation qui intervient lors du visionnage d'une image.

Nous avons dans la deuxième partie évoqué les défauts d'images liés à au démosaïquage et nous avons appris à les identifier. Ces défauts ne semblent pas forcément couvrir tous les cas de figure et nous nous retrouvons parfois dans des situations difficiles à décrire comme dans la partie 3. Il y aurait peut-être matière à approfondir ce sujet

également : nous pourrions tenter de définir plus précisément les défauts visuels dus au démosaïquage pour mieux pouvoir évaluer la qualité de ce dernier. Nous avons décrit certains algorithmes et les principes majeurs qui les composent. Nous constatons qu'il est rare de savoir de quel principe se servent les algorithmes des fabricants de caméra et éditeur de logiciels de post-production. Nous pourrions tenter de trouver de manière empirique quels sont les principes utilisés par les fabricants et éditeurs. Dans tous les cas, il est déplorable que ce point soit si peu documenté de la part des fabricants et des éditeurs de logiciels. Nous avons aussi décrit des méthodes d'évaluation et évoqué la pertinence de ces méthodes pour un chef opérateur. D'une manière générale, il me semble que ce dernier point est encore crucial que ce soit pour nous en tant qu'opérateur ou pour la recherche. La littérature à laquelle j'ai eu accès à ce propos n'est pas suffisante pour conclure sur l'état de la recherche, mais il est néanmoins primordial à mon sens de trouver des manières d'évaluer la qualité de démosaïquage qui parlent à un opérateur.

Dans la troisième partie nous avons testé et comparé différents algorithmes sur plusieurs caméras de cinéma. Nous pouvons constater tout d'abord grâce au logiciel Arriraw Converter que la qualité d'image d'une caméra peut changer au cours de sa durée de vie, au gré des mises à jour des algorithmes. C'est pourquoi la plupart des caméras de cinéma sont équipées d'un FPGA (Field Programmable Gate Array) en guise de processeur. Ce type de processeur est comme son nom l'indique programmable et donc on peut réellement augmenter la qualité de l'image d'une caméra grâce à une mise à jour. Il me semble donc important de tester et comparer aussi l'image rendue par les caméras avant et après des mises à jour du fabricant. D'autre part, on a constaté que les rendus d'un logiciel tiers qui propose une sorte de réglage constructeur ne sont pas les mêmes que ceux proposés par le constructeur dans deux des trois cas présentés. Ce travail nous propose donc d'être méfiant, ou tout au moins prudent quant aux propositions des éditeurs de logiciels. En relation avec le point précédent, il serait intéressant de voir combien de temps prennent les éditeurs de logiciels tiers à mettre à jour leurs traitements

et leurs démosaïquages en fonction des mises à jour des caméras. Nous pourrions étendre ce travail à d'autres logiciels et aussi aux logiciels internes de différents laboratoires numériques. Aussi, nous avons constaté, notamment avec des images en 8k la dépendance de la qualité d'image envers d'autres paramètres connexes au démosaïquage comme la résolution et la définition du capteur, ou encore la réduction de bruit. Nous pourrions encore dédier un travail de mémoire entier à la réduction de bruit dans l'image et son influence sur la qualité de démosaïquage et sur l'image globale.

Enfin, la partie pratique de mémoire, qui sera présentée à l'oral, nous permet aussi de comprendre grâce à des cas extrêmes (mais tout à fait réalisables et communs lors de réelles prises de vue) l'inter-influence des trois canaux RVB lors du démosaïquage et le réel besoin d'une lumière au spectre propre et large pour une restitution optimale du détail. Cette PPM met aussi en avant un point évoqué dans la troisième partie, à savoir que plusieurs défauts appartenant à des domaines différents comme celui de l'optique et du dématricage peuvent se superposer et influencer l'un sur l'autre.

Pour terminer, nous pouvons conclure que ce mémoire nous ouvre à de nombreuses problématiques liées au dématricage, qui interagissent les unes avec les autres et qu'il est impossible d'en traiter une sans considérer les autres.

Bibliographie, Filmographie et références

Ouvrages

- BELLAICHE Philippe, *Les secrets de l'image vidéo*, Eyrolles, Paris, 2011
- NAKAMURA Junichi, *Images sensors and signal processing for digital still cameras*, Taylor & Francis, Boca Raton, 2006
- LUKAC Rastislav, *Single sensor imaging*, Taylor & Francis, Boca Raton, 2009
- DELIGIANNIDIS Leonidas et ARABNIA Hamid R., *Emerging trends in image processing, computer vision, and pattern recognition*, Morgan Kaufmann, Waltham, 2015
- CAMPILHO Aurélio et KAMEL Mohamed, *Image analysis and recognition*, Springer, New York, 2014
- E. CELEBI et al, *Color and Video Enhancement*, Springer, Heidelberg, 2015

Thèses et mémoires

- H. Phelippeau, *Méthodes et algorithmes de dématricage et de filtrage du bruit pour la photographie numérique*, Université Paris-Est, 2009
- O. Losson et al, *Du capteur à l'image couleur*, Hermès, pp.151-184, 2012
- O. LOSSON et al, *Comparison of color demosaicing methods*, Advances in Imaging and Electron Physics, Elsevier, 2010,

Brevets

- M.F. Tompsett, "Charge Transfer Imaging Device" U.S. Patent 4,085,456, Avril 1978
- B.E. Bayer "Color Imaging Array" U.S. Patent 3,971,065, Juillet 1976
- R. B. Merill, « Color separation in an active pixel cell imaging array using a triple-well structure" U.S. Patent 5,965,875, Octobre 1999

- T. Watanabe et Al, « Solid-state imaging device, drive method thereof and electronic apparatus » U.S. Patent 8,614,759, Décembre 2013
- T. IWANE, “Optical low-pass filter, a camera, an imaging apparatus, and a method of manufacturing an optical low-pass filter”, Patent WO200800450A1, Janvier 2008
- D.R. COK, «Signal processing method and apparatus for sampled image signals», U.S. patent 4,630,307, to Eastman Kodak Co., Patent and Trademark Office, décembre 1986
- HAMILTON J. F., ADAMS J. E., «Adaptive color plan interpolation in single sensor color electronic camera », U.S. patent 5,629,734, Washington D.C., mai 1997
- HIBBARD R. H., « Apparatus and method for adaptively interpolating a full color imageutilizingluminance gradients», U.S. patent 5,382,976, Washington D.C., janvier 1995
- LAROCHE C. A., PRESCOTT M. A., « Apparatus and method for adaptively interpolating a full color image utilizing chrominance gradients», U.S. patent 5,373,322, juin 1993

Articles scientifiques et publications

- E.R Fossum “Active Pixel Sensor: Are CCDs dinosaurs ?” *Proc. SPIE, 1900, Charge Coupled Devices and Solid-State Optical Sensors III, 2-14, 1993*
- M. Parmar et S.J. Reeves, *Selection of Optimal Spectral Sensitivity Functions for Color Filter Arrays*, IEEE Transactions on Image Processing, Vol 19, N°12, Décembre 2010
- R. Likac et K. N. Plataniotis, *Color Filter Arrays: Design and Performance Analysis*, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol 51, N°4, novembre 2005, p1261

- K. Hirakawa et P.J. Wolfe, *Spacio-spectral Color Filter Array Design for Optimal Image Recovery*, IEEE Transactions on Image Processing, Vol 17, N°10, Octobre 2008
- D. Paliy et al., *Denoising an Interpolation of Noisy Bayer Data with Adaptive Cross-Color Filters*, Institute of Signal Processing, Tampere University of Technology and Nokia Research Center, 2008
- B.K. GUNTURK et al, *Color plane interpolation using alternating projections*, IEEE Transactions on Image Processing, vol 11, n°9, septembre 2002
- COK D. R., «Reconstruction of CCD images using template matching », Proceedings of the IS&T's 47th Annual Conference, Physics and Chemistry of Imaging Systems (ICPS'94), vol. 2, Rochester, New York, U.S.A., p. 380-385, mai 1994
- WU X., ZHANG N., « Primary-consistent soft-decision color demosaicking for digital cameras », IEEE Transactions on Image Processing, vol. 13, n° 9, p. 1263-1274, septembre 2004
- KIMMEL R., « Demosaicing : image reconstruction from color CCD samples », IEEE Transactions on Image Processing, vol. 8, n° 9, septembre 1999
- LUKAC R., PLATANIOTIS K. N., « Universal demosaicking for imaging pipelines with an RGB color filter array», Pattern Recognition, vol. 38, avril 2005

Magazines

- « Star Wars Episode II: Exploring a New Universe”, *The American cinematographer*, ASC, Septembre 2002
- « Collateral: Hell on Wheels», *The American cinematographer*, ASC, Aout 2004

Ressources en ligne

- Micron, "The Evolution of Digital Imaging: From CCD to CMOS" [en ligne]
http://web.pdx.edu/~larosaa/Applied_Optics_464-564/Projects_Presented/Projects-2008/CCD_and_CMOS/From_CCD_to_CMOS_Tutorial_from_Miron_Inc.pdf
- « Motion picture film », *State library of Queensland*, [En ligne]
http://www.slq.qld.gov.au/resources/preserving-collections/preservation_guides/motion-picture-film
- « Sample R3D Files », *Red*, [En ligne]
<https://www.red.com/sample-r3d-files>
- « ALEXA Sample Footage », *Arri*, [En ligne]
https://www.arri.com/camera/alexa/learn/alexa_sample_footage/
- « Sony PMW-F55 Raw Samples For Download », *Alister Chapman*, [En ligne]
<http://www.alisterchapman.com/samples/f55-raw-samples.zip>

Films et œuvres cités

- LUCAS G., *Star Wars Episode I : The Phantom Menace* états-Unis, 1999, 136 min, 2.39 :1, HD et pellicule
- LUCAS G., *Star Wars Episode II : Attack of the Clones* états-Unis, 1999, 142 min, 2.39 :1, HD
- MANN M., *Collateral* états-Unis, 2004, 2,35:1, HD
- PITOF, *Vidocq*, France, 2001, 98 min, 1.85 :1, HD

Dossier de Partie Pratique de Mémoire

ENS Louis-Lumière

La Cité Du Cinéma - 20 rue Ampère BP 12 – 93213 La Plaine Saint-Denis
Tel. 33 (0)1 84 67 00 01
www.ens-louis-lumiere.fr

Partie Pratique de Mémoire de Master-2

Spécialité cinéma, promotion 2017-2018

Soutenance de Juin 2018

**« Comparaison et mise en défaut d'ensembles matrice de Bayer –
Algorithme de démosaïquage »**

Pierre POTONNIER

Cette PPM fait partie du mémoire intitulé : Matrices de filtres colorés et démosaïquage : une approche de la restitution du détail en numérique

Directeur de mémoire : **Paul BYDLOWSKY**

Présidente du jury cinéma et coordinatrice des mémoires : **Giusy PISANO**

123/133

SOMMAIRE

SOMMAIRE	124
NOTE D'INTENTION	126
LISTE MATERIEL	128
Caméra	128
Machinerie	129
Lumière	130
LISTE EQUIPE	132
PLAN DE TOURNAGE.....	132
PLAN DE POST-PRODUCTION.....	133
ÉTUDE TECHNIQUE ET ÉCONOMIQUE	133

NOTE D'INTENTION

Mon projet de partie pratique de mémoire est divisé en deux parties dont les résultats se complèteront. Une première partie sera constituée de tests sur mires qui consisteront à tester une caméra (Arri Alexa) avec différents algorithmes de démosaïquage. Une seconde partie consistera elle à tester cette même caméra et les algorithmes dans des conditions de prise de vue réelle : portraits de visages et prises de vue de paysages. Le but de ce travail est à la fois de mettre en évidence des conditions de prise de vue qui mettraient en défaut le couple filtre de bayer/démosaïquage et de tenter de voir une application dans certains cas de prise de vue.

L'idée du travail en avec des mires est de mettre en évidence les principaux paramètres qui influencent la définition de l'image et les défauts liés au filtre de bayer et le démosaïquage des images. Ainsi, le tournage devra s'effectuer en RAW pour permettre l'utilisation de plusieurs méthodes de démosaïquage. Ces méthodes doivent être testées lors de plusieurs tests :

- Un filtre de Bayer n'a pas la même répartition de photosites dédiés au rouge au vert ou au bleu et les algorithmes de reconstruction de l'image ne traitent pas chacune des composantes couleur de manière égale. Avec une mire de type CZP par exemple, nous pouvons donc s'intéresser à la sensation de netteté et des artefacts en fonction de la fréquence spatiale du motif et la longueur d'onde de la lumière envoyée. Cela peut se faire à l'aide de filtres ou d'une source paramétrable par exemple.
- On pourra aussi mettre en évidence les défauts de moiré et de moiré coloré et essayer de déterminer dans quelles conditions ils sont le plus marqué en fonction des algorithmes de démosaïquage.

La mise en image permettra d'observer l'influence des remarques précédentes sur des images qui peuvent correspondre à l'utilisation prévue du matériel de prise de vue et des algorithmes de traitement qui l'accompagne. L'utilisation de mires de prises de vue ne peut nous donner une idée précise des implications dues aux algorithmes sur des cas idéaux.

Il sera donc logique d'accompagner les essais sur mire de prises de vue dans une variété de situation dont voici un aperçu :

- Il serait intéressant de présenter un cas d'éclairage studio sur un visage. Aussi avec différentes couleurs d'éclairage, je pense notamment à des éclairages monochromatiques ou s'en approchant.
- D'autre part, filmer des situations en extérieur qui sont connues pour générer des défauts lors du démosaïquage peuvent nous permettre de voir en action ces défauts.

Ces essais doivent se tourner impérativement en RAW pour expérimenter plusieurs algorithmes de démosaïquage en post production. On pourra malgré tout tourner aussi au format Prores (intégré à la caméra pour les Alexa), pour tenter de comparer l'algorithme intégré dans la caméra aux solutions de post production.

Pour la Post Production J'utiliserais les démosaïquage proposée dans des logiciels accessibles à tous, tel que Davinci Resolve et Arri Raw Converter.

Choix du matériel :

Comme caméra, il semble logique de choisir l'arri alexa, car c'est une des caméras les plus utilisées en France pour les tournages RAW.

Le choix d'optique se porte principalement sur les cooke mini S4 car ils sont qualifiés par le fabricant comme « prêts pour le 4K » et devrait permettre un pouvoir résolvant suffisant pour que ce soit l'élément le moins handicapant dans la restitution du détail des images.

En termes de lumière, j'essaie de proposer des éclairages aux technologies différentes pour voir l'influence possible du spectre de l'éclairage mis en jeu au tournage dans le démosaïquage.

LISTE MATERIEL

Caméra

Quantité	NOM
1	Arri Alexa Standard
1	Enregistreur RAW codex + Cartes (PRÊT NEXTSHOT)
1	Série Cooke Mini S4 (PRÊT SENSITO)
1	Série Optiques Zeiss Sensito
4	Cartes SxS 32Go
1	Commande de point Chrosziel + 1 pont pour tiges 19mm
1	Mattebox 4x5,6 (2 tiroirs) + tiges
2	Carte SD 32Go
1	Jeu Batterie Bebob V-lock 12V + Chargeur (4batteries)
1	Tête fluide Satchler
1	Grandes branches + petites branches
2	Moniteur 25" sony oled + câble alimentation
1	starlite HD 5" + mini BNC + câble alimentation RSIII
1	Touret BNC 10m
10	BNC-HD 75 ohm (4 longs et 6 courts)
1	Oscillo leader + câble alimentation + spigot
2	Roulante Bleue + sangle + cyclone
1	Ordinateur + alimentation
1	Lecteur carte SxS + câble USB
1	Disque dur 2 To (ACHAT PPM)

1	Disque dur navette + 1 câble USB 3.0
Valise Opérateur	
1	Cellule incidente spectra + piles
1	Spotmètre
1	spectromètre+ piles
1	Verre de contraste
Valise Assistant	
1	Mallette assistant
1	Gris 18%
1	Mire sharpness
1	Dust off
1	Acétone
2	Voile caméra
1	Chaussette

Machinerie

Quantité	NOM
5	Gueuses
5	Pinces stanley
5	Elingues
1	Clap ou Ardoise identification
5	borniols + taps

Lumière

Quantité	NOM
1	Fresnel 150W
1	Fresnel 300W
2	Fresnel 500W
2	Fresnel 1kW
1	SL1
1	Kino 120 4T + Ballast + montée + 4T 5600 + 4T 3200
5	Prolongateurs 16A
3	Boîte alimentation M6
2	dimmer 3kW
2	dimmers 500W
1	Deperons
1	Polystyrènes
1	Portes-poly
1	cadre de diffusion 216 1x1
1	cadre de diffusion 250 1x1
1	cadre de diffusion 251 1x1
1	cadre de diffusion 250 0,6x0,6
1	grand jeu de Mamas
1	drapeau floppy
3	petits drapeaux
10	rotules
10	cyclones (5 grand + 5 petits)
6	Clamps + 3 Bras magiques
4	Pieds de 1000 intelligents
2	Pied baby 1000

2	bras de déport
2	Triplettes
	Gélatines ND3 / ND6 / ND9
	Gélatines CTO Full / 1/2 / 1/4 / 1/8
	Gélatines CTB Full / 1/2 / 1/4 / 1/8
	Diffusions 216 / 250 / 251 / 252
	Gaffer 50mm Noir/blanc
	Gaffer 25mm 3 couleurs
	cinéfoil
	Pinces à linge
	Ampoules spare 1kW, 500W, 300W,

LISTE EQUIPE

Réalisation et Chef opérateur : Pierre Potonnier

Chef Electro : Nicolas Gallardo

Aide : Julien Rabia et Alexandra Eon

Figurante : Winnie Dhénin

PLAN DE TOURNAGE

Le tournage aura lieu le vendredi 18 mai en salle d'essai caméra et en extérieur dans l'enceinte de la cité du cinéma.

La préparation se fera le jeudi 17 après midi.

Le rendu du matériel se fera le vendredi soir ou le samedi matin.

Planning journée

9H-11H Plans sur mires (Différents éclairages et optiques)

11H-13H Plans sur visage Figurant (Différents éclairages et optiques)

14H-15H30 Plans figurant en extérieur (Différentes optiques)

15H30-18H Plans paysages en extérieur (Différentes optiques)

PLAN DE POST-PRODUCTION

La post production sera étalée en plusieurs étapes :

-Traitement des plans avec l'algorithme sous matlab pendant 3 jours (en salle de sensito ou à mon adresse personnelle)

-Traitement des plans avec les logiciels ARRI raw converter et Davinci Resolve pendant 2 jours (en salle de sensito ou à mon adresse personnelle)

-Montage des images finales dans le logiciel Résolve et export pendant 1 jour (en salle sensito ou à mon adresse personnelle)

- Création du DCP à l'école en salle d'étalonnage et vérification en salle de projection (1/2 journée)

ÉTUDE TECHNIQUE ET ÉCONOMIQUE

Objet	Cout TTC
Achat disque SSD 1to	260 €