

Ecole Nationale Supérieure Louis Lumière
Master Photographie - Promotion 2023



ÉTUDE DE LA TEXTURE DU FILM : GRAIN, HALATION ET RENDU DE DÉTAILS.

Recherche de pipelines de traitement d'images redonnant
de la matérialité aux images numériques .

Mémoire de master 2

Clément Montmea

Direction

Pascal MARTIN, professeur d'optique appliquée, ENS Louis-Lumière.

Sean COOPER, Senior Color Scientist, ARRI

Membres du jury

Véronique FIGINI, maîtresse de conférences en histoire de la photographie.

Pascal MARTIN, professeur des universités à l'ENS Louis-Lumière.

Sean COOPER, Senior Color Scientist, ARRI

Alain SARLAT, professeur de sensitométrie et colorimétrie, ENS Louis-Lumière

Olivier PATRON, Digital Imaging Technician (DIT), Indépendant

Réalisé chez : Arnold & Richter Cine Technik GmbH (ARRI)

Date de soumission : 7 Décembre 2023

Remerciements

Ce mémoire a été mené chez Arnold et Richter Cine Technik à Munich et a été supervisé par Sean Cooper, Senior Color Scientist chez ARRI. Je tiens à remercier Sean Cooper pour sa supervision ainsi que Harald Brendel, Tamara Seybold et Jeffrey W. Hagerman pour m'avoir accueilli dans leur équipe. Merci à Dimitri Kloster de l'équipe optique pour son aide sur les mesures MTF, Laurent Gudman et Benjamin Herb pour leurs retours et leur aide lors de l'acquisition des données. Plus largement, je tiens à remercier toute l'équipe d'Image Science ainsi que le département d'optique, de tests et de support d'ARRI qui m'ont aidé dans mes recherches et l'acquisition de mes données.

Je tiens à remercier mon directeur, Pascal Martin, pour l'encadrement de ce mémoire, Stéphanie Solinas et Anne-Lou Buzot pour leur contribution à la partie pratique. Je remercie l'Ecole Nationale Supérieure Louis-Lumière pour son soutien et pour m'avoir donné l'opportunité d'assister au CIC31.

Enfin, je voudrais adresser un merci tout particulier à Alain Sarlat sans qui rien de tout cela n'aurait été possible.

Pour la série de photos documentaires présentées en partie pratique, je tiens à remercier Arlette Maussan, Jacques Renoud et Jean-Claude Bareille qui m'ont fait visiter les exploitations minières locales. Merci à Benjamin Bergnes pour ses conseils lors de la préparation du projet.

Enfin, je tiens à remercier ma famille et plus particulièrement mes parents pour leur soutien. Un grand merci à Jean Gibert et Elisa Bapst pour leur aide et leur soutien constant depuis le début de ce projet.

Résumé

Étude de la texture du film : Grain, Halation et Rendu de Détails explore une question esthétique et technique chère aux mondes de la photographie et du cinéma. Le manque d'attributs colorés et spatiaux lié aux capteurs numériques pousse les photographes et chefs opérateurs à revenir à un support de captation argentique. L'image latente de la structure cristalline argentique est développée dans des bains chimiques, révélant l'image captée par la caméra. Ces millions de particules d'argent, de différentes tailles, ainsi que le support et la structure du film feront de cette image un objet matériel par essence. Ces hasards et imperfections techniques apportées par la matérialité du médium sont la clé de la texture et de la couleur des images argentiques. Ce mémoire cherche alors à déterminer dans quelle mesure ces caractéristiques peuvent être imitées en images numériques. Via des mesures physiques, les films seront analysés pour être mieux décrits et compris. Ensuite, des processus de traitement d'image seront élaborés et testés pour obtenir différents types de textures, du grain à l'halation, en passant par le rendu de détail. En se basant sur l'importance cruciale accordée à la matérialité dans ce mémoire, la partie pratique, *Omniprésence de la Mine*, abordera les exploitations minières et leurs conséquences. Nous arpenterons les paysages français et allemand à la recherche de traces de mines passées, présentes et bientôt futures.

Sommaire

Introduction

1. Mise en Contexte

1.1 Acquisition d'images

1.1.1 Acquisition d'images numériques

1.1.2 Films argentiques

1.2 Traitement des images

1.2.1 Traitement des couleurs

1.2.2 Traitement spatial

1.2.3 Métriques et concepts spatiaux

1.3 Connaissances actuelles en matière de synthèse de textures

1.4 Alexa 35

1.5 Scanner

2 - Acquisition des données

2.1 Sensitométrie

2.1.1 Linéarisation du Film

2.1.2 Exposition

2.2 Plaques de grains - Grain Plate (Flat Field)

2.3 Fente inclinée - Slanted Slit

2.4 Images d'évaluation

3 - Restitution des couleurs

3.1 Gestion de la couleur ACES pour les films

3.1 Extraction de données

3.1 Correction de la couleur

4 - Mesurer la texture du film

4.1 Rendu de détail

4.1 .1 Méthode du Bord Incliné - Slanted Edge

4.1.1.1 Dépendance au bruit

4.1.1.2 Région d'intérêt

4.1.2 Optimisation

4.1.3 Résultats préliminaires

4.2 Halation

4.2.1 Hypothèses théoriques

4.2.2 Domaine et comportement

4.2.3 MTF et taille

4.2.4 Couleur

4.3 Grain

4.3.1 Puissance

4.3.2 Corrélation des couches

4.3.3 AutoCorrélation et Densité Spectrale de Bruit

4.3.4 Résultats préliminaires

5 - Émulation de texture de film

5.1 Rendu des détails

5.2 Halation

5.3 Grain

5.3.1 Génération de bruit

5.3.2 Filtrage

5.4 Aperçu

6 - Évaluation

6.1 Mesures objectives

6.1.1 Analyse du bruit

6.1.2 Mesures MTF

6.1.3 Évaluation des couleurs

6.2 Évaluation visuelle

7 - Partie pratique : Omniprésence de la Mine

Conclusion et perspectives

Liste des acronymes

Glossaire

Liste des Figures

Annexes

Introduction

En photographie et au cinéma, le terme *texture* fait référence traditionnellement aux caractéristiques de la scène capturée telles que l'herbe, un morceau de tissu, ou un objet composé de petits motifs. Cependant, la texture peut également désigner des attributs qui ne dépendent pas de la scène capturée, mais du périphérique de capture lui-même. Les films, en raison de leur matérialité et de leur base physique, présentent des caractéristiques de texture telles que le grain et l'halation. Lorsqu'ils sont exposés à la lumière, ces caractéristiques physiques s'intègrent à l'image résultante. De plus, en lien avec la matérialité du film photographique, le hasard doit être pris en compte, car il découle directement de la structure inhérente des halogénures contenus dans l'émulsion du film. En revanche, les appareils photo numériques sont moins imprévisibles, étant organisés en mosaïque avec des bordures et un nombre de particules sensibles fixes.

Ce mémoire tentera de nous exposer les paramètres qui définissent la texture du film en termes de grain, de rendu des détails et d'halation, tout en proposant un protocole de traitement pour restaurer ces caractéristiques liées à la matérialité du film.

La préparation du mémoire à l'Ecole Nationale Supérieure Louis-Lumière commence dès la deuxième année lors de la recherche d'un sujet d'étude pertinent. En tant que photographe, mon intérêt se portait sur le rendu filmique (en termes de couleurs) et la numérisation des films. Il est important de noter que, pour la photographie, il n'existe pas d'appareils modernes adaptés à la numérisation correcte des films négatifs couleur. Malgré la diversité de scanners sur le marché, aucun ne répond entièrement aux besoins de numérisation des films photographiques en raison de sensibilités spectrales inadéquates, de vitesses de numérisation insuffisantes, ou de netteté ne rendant pas correctement le grain du film.

Les scanners de films cinéma, tels que l'ARRISCAN, sont mieux adaptés à la capture du matériel photographique pour lequel ils ont été conçus. Equipé de LED à bande

spectrale étroite, d'un capteur monochromatique haute résolution, d'un objectif macro précis et d'une vitesse de numérisation d'environ une image par seconde, l'ARRISCAN est un exemple idéal. De plus, tout en acquérant des données de manière réfléchie, l'ARRISCAN traite la couleur avec des corrections colorées dont le processus de création m'a particulièrement intéressé au moment où je n'avais que des connaissances de bases en science des couleurs et en traitement d'image.

Suite à une rencontre avec Harald Brendel, Chef du département Image Science chez ARRI, nous avons convenu que le département des scanners n'était pas une option pour mon mémoire, mais travailler sur la texture des images, en particulier celle des films photographiques, était une perspective intéressante.

L'enseignement à l'École Nationale Supérieure Louis-Lumière ne comprend pas spécifiquement de cours dédié au traitement de l'image, mais se concentre plutôt sur les techniques de l'image. En revanche, le cours de sensitométrie et colorimétrie offre une compréhension des bases de la science de l'image, de la captation à la projection, en numérique et en analogique. Les autres cours, notamment dans le département cinéma, se concentrent davantage sur les besoins de l'industrie cinématographique, formant des techniciens de l'image tels que les directeurs de la photographie, les électriciens, les étalonneurs et les DITs.

Pour me préparer au stage chez ARRI, j'ai suivi des cours pendant un semestre à la Sorbonne Université - Pierre et Marie Curie, qui propose un programme de master en traitement d'image sous la direction d'Isabelle Bloch.

À Munich, le travail sur le mémoire a débuté après une période d'adaptation d'un mois et demi où je me suis familiarisé avec le pipeline¹ et les outils de traitement d'ARRI. J'ai commencé mes recherches sur un ensemble de données préalablement acquises pour créer des transformations couleur et extraire des caractéristiques de grain. J'ai notamment exploré des techniques telles que les corrections de couleurs basées sur des matrices 3x3, les matrices en polynôme de racine et la création de LUT 3D. De plus, j'ai étudié l'analyse de la densité spectrale de puissance du grain (Noise Power Spectra) et la simulation géométrique de l'halation. Nous avons commencé à réfléchir à la manière dont nous devrions acquérir un nouvel ensemble de

¹ Suite d'opération de traitement du signal.

données, en particulier pour les caractéristiques spatiales et chromatiques, ainsi que pour les futures images d'évaluations. Les protocoles d'acquisition de données ont été validés par des tests sur film noir et blanc.

À la fin du stage, nous avons élaboré des protocoles de traitement pour redonner de la matérialité aux images numériques de l'Alexa35. Ces algorithmes, basés sur des mesures scientifiques des caractéristiques de la texture du film, visent à reproduire visuellement le "look" du film en termes spatiaux.

Tout au long de ce stage et à travers ce mémoire, nous avons défini la texture du film autour de trois caractéristiques clés : le grain, le rendu des détails et l'halation. Chacune de ces caractéristiques a été subdivisée en paramètres, introduits dans la partie Contexte et étudiés en profondeur tout au long du mémoire, en particulier dans la partie Analyse.

Étant donné que ARRI est l'une des marques leaders du cinéma haut de gamme, nous avons souhaité explorer ce sujet de texture avec des connaissances solides dans divers domaines de la science de l'image, afin de prendre des décisions éclairées. Le sujet impliquait à la fois le traitement spatial et coloré, ainsi qu'une compréhension approfondie de la sensitométrie, de la colorimétrie et de la chaîne de développement des films analogiques. De plus, des compétences photographiques, telles que l'utilisation d'un appareil photo argentique et le développement de films noir et blanc, se sont avérées essentielles pour mener à bien ce mémoire. L'apprentissage et la création de nouveaux outils ont été particulièrement enrichissants et stimulants, nous permettant d'étudier la question de la texture de manière approfondie.

Ce mémoire est une présentation complète de ce qui a été accompli en termes d'acquisition de données, d'analyse de données et de traitement d'images au cours des six derniers mois.

NB : CE MÉMOIRE AYANT ÉTÉ RÉALISÉ CHEZ ARRI À MUNICH, SA VERSION ORIGINALE A ÉTÉ PENSÉE ET RÉDIGÉE EN ANGLAIS. IL EST DONC TRÈS FORTEMENT RECOMMANDÉ DE LIRE LA VERSION ANGLAISE LORSQUE C'EST POSSIBLE.

1. Mise en Contexte

Cette section a pour objectif de poser des bases communes qui seront pertinentes pour la compréhension de ce mémoire. Ces fondements seront principalement techniques : tant pour la partie *acquisition physique* que de la partie *traitement d'image*. Cette mise en contexte posera également les bases de l'acquisition numérique et argentique.

La première section abordera l'acquisition physique de la lumière pour différents supports de capture. Elle présentera les principales différences de signature de texture suivant les techniques d'acquisition.

La deuxième section abordera le traitement du signal, de l'image *raw* à l'image projetée. Cette section se concentrera sur la façon dont le traitement du signal, notamment coloré, façonne l'image visualisée en termes de texture, de couleur et de gradation. Le traitement spatial sera également abordé dans cette section ainsi que les métriques qui seront utilisées plus tard dans ce mémoire.

La troisième section donnera un aperçu de ce qui est connu et recherché dans nos trois composants de texture : le grain, l'halation et le rendu de détails.

Les deux dernières sections présenteront les pipelines de traitement et les principes utilisés par nos deux principaux appareils d'acquisition, l'ARRI Alexa35 et l'ARRISCANXT.

1.1 Acquisition d'images

1.1.1 Acquisition d'images numériques

Les appareils photo numériques enregistrent une image grâce à leur capteur constitué de photosites individuels. La lumière frappant ces photosites est ensuite convertie en charge électrique proportionnelle au nombre de photons capturés. Le courant électrique est numérisé grâce à un convertisseur analogique-numérique (ADC). Il

existe deux grandes familles de capteurs numériques qui sont les CCD et les CMOS². Ce dernier est aujourd'hui le plus utilisé, notamment grâce à sa plage dynamique accrue et sa faible consommation électrique.

L'appareil décrit dans le paragraphe ci-dessus est uniquement monochromatique et sensible aux changements d'intensité de la lumière. Sa sensibilité spectrale couvre plus que le spectre visible sans en différencier les longueurs d'onde courtes, moyennes et longues. Des filtres UV et IR sont utilisés devant les photosites pour bloquer les longueurs d'onde non visibles auquel le capteur est sensible. Dans une caméra à capteur unique, un CFA (Color Filter Array, type Bayer)³ filtre la lumière avec un motif composé de trois filtres passe-bande, rouge, vert et bleu. Ce principe trichromatique imite le système visuel humain lui-même basé sur ce principe. L'image d'un capteur unique filtré par un CFA récupère toutes ses informations en couleur par interpolation spatiale lors de l'étape de dématricage (voir section 1.2). Chaque photosites et colorants concaténés avec son empilement optique (filtres UV/IR et micro-lentilles) possède une sensibilité spectrale donnée qui définira sa réponse à la lumière et surtout son rendu des couleurs⁴. Le pipeline de traitement des couleurs présenté dans la section à venir est conçu pour modifier la sensibilité spectrale brute et la faire correspondre à la vision humaine définie par le CIE 1931 Standard Observer.

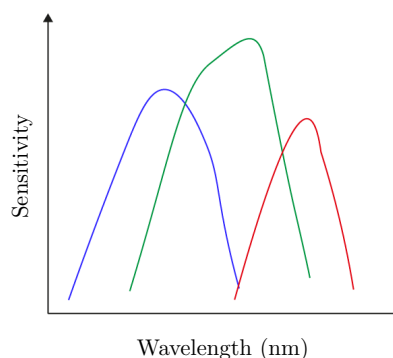
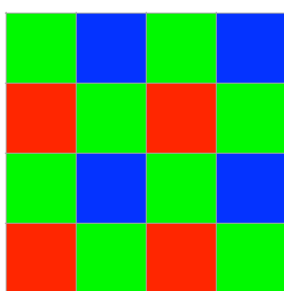


Figure 1 - Matrice de Bayer & sensibilité spectrale d'un capteur

² RWG Hunt, *The Reproduction of Colour*, p.555

³ Edward J. Giorgianni, *Digital color management : encoding solutions*, p.20-21

⁴ *ibid.*.

1.1.2 Film analogique

Les films analogiques sont une technologie reposant sur des halogénures d'argent ou autres halogénures métalliques sensibles à la lumière. Dans l'industrie cinématographique, les cristaux sensibles sont mis en suspension dans une base organique composée de gélatine. Même s'ils font partie de la famille des procédés analogiques, les autres procédés photographiques métalliques comme le cyanotype, le ferrotipe ainsi que d'autres bases organique comme l'albumine ou la gomme arabique ne seront pas explorés.

Film noir et blanc

Les films noir et blanc sont composés d'une base en gélatine chargée d'un mélange d'halogénures d'argent (généralement un mélange de bromure et de chlorure d'argent). Plusieurs facteurs affectent la sensibilité à la lumière de chaque cristal comme son type (chlorure/bromure), sa taille et sa forme. Des paramètres supplémentaires tels que la profondeur dans la couche d'émulsion affecteront la sensibilité du grain⁵ (par rapport à la quantité de lumière mesurée à la surface du film). Enfin, les produits chimiques de développement ainsi que les conditions et techniques utilisées pour développer le film.

Chaque cristal d'argent exposé à la lumière donnera, après développement, un résultat binaire : le grain a été développé ou non (noir ou blanc). Tout en ayant un résultat binaire, la courbe de réponse d'un grain est subtile et la sensibilité quantique de cristaux identiques s'étale généralement selon une distribution normale (Voir figure 2)⁶. La variance d'une telle distribution peut être modifiée en changeant les paramètres mentionnés ci-dessus ce qui affectera alors directement la plage dynamique qu'un groupe d'halogénures d'argent peut enregistrer.

⁵ W. F. Berg, *The Photographic Emulsion Layer as a Three-Dimensional Recording Medium*

⁶ J.C Dainty and R. Shaw, *Image Science : Principles, Analysis and evaluation of Photographic-Type Imaging Processes*, p.88 and 131

Lorsque nous considérons la réponse globale d'un film, nous trouverons un mélange de cristaux de différents types et surfaces soigneusement conçus et sélectionnés. Leur sensibilité respectives sont superposées pour élargir la plage dynamique du film. Les émulsions noir et blanc sont généralement un mélange de deux cristaux de sensibilité différente, simplement appelés cristaux lents et rapides. Alors que le changement de taille de grain est rarement visible dans la courbe caractéristique (courbe H&D) d'un film, il *peut* être détecté dans les caractéristiques de fréquentielles du grain (allant du gros grain uniquement à un mélange de gros et petit grain dans les expositions les plus élevées). Par conséquent, les caractéristiques du bruit, en termes de taille et de puissance, dépendront de l'exposition.

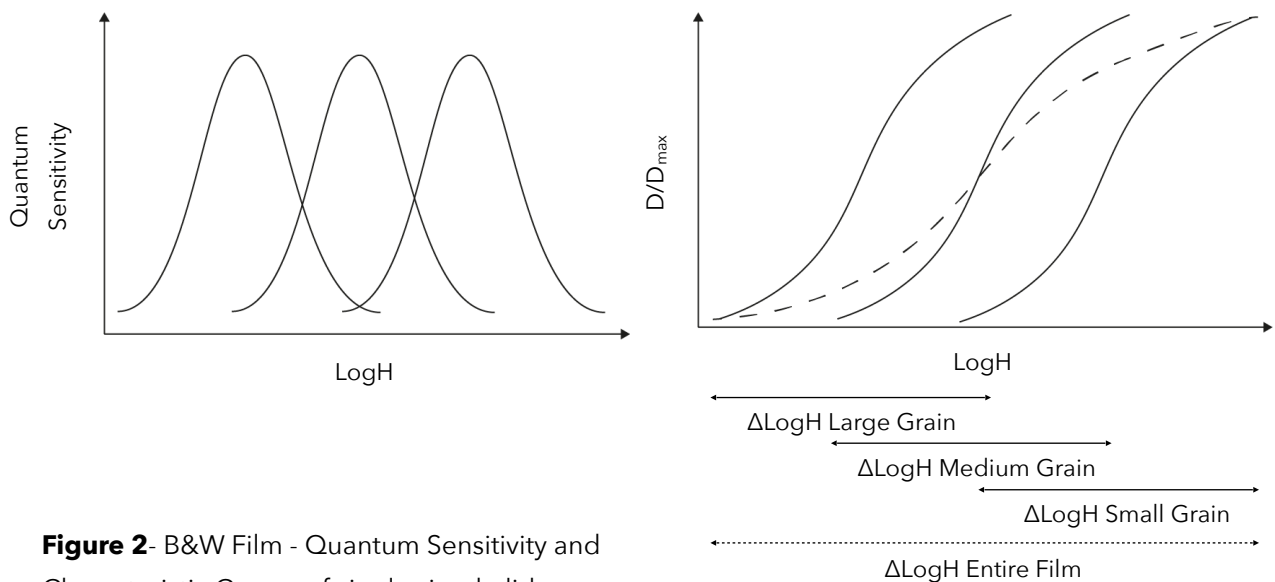


Figure 2- B&W Film - Quantum Sensitivity and Characteristic Curves of single size halides

Même si la sensibilité spectrale peut paraître moins importante dans les films noir et blanc, on peut distinguer deux grandes catégories de films. Les films orthochromatiques et panchromatiques sont respectivement sensibles aux longueurs d'onde courtes et moyennes (dans le domaine visuel) et sensibles aux longueurs d'onde courtes, moyennes et longues pour la seconde (voir figure 3). La sensibilité spectrale des films noir et blanc est contrôlée de la même manière que celle des films couleurs, avec des colorants sensibilisateurs étendant leur sensibilité initiale - aux UV et bleues - à des longueurs d'onde plus longues telles que le vert, le rouge et même l'IR.

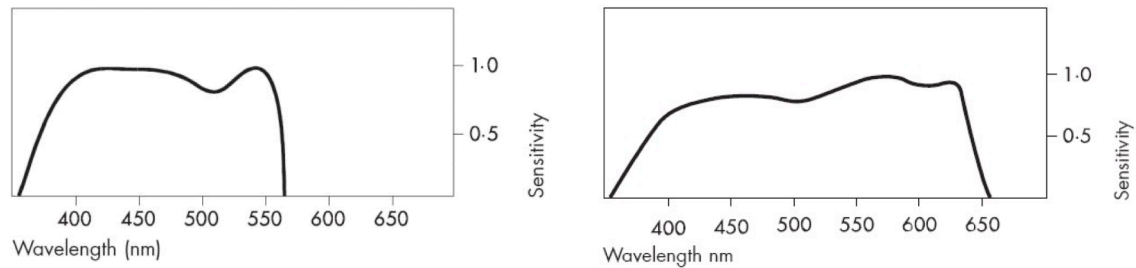


Figure 3 - Ilford Ortho Plus & Ilford HP5 Plus - B&W
Spectral Sensitivity - Ilford

Film négatif couleur

Les films couleur chromogènes utilisent également des halogénures d'argent mais uniquement comme intermédiaire pour l'image couleur finale. Les halogénures d'argent ont la propriété physique d'être sensibles à la lumière, ce qui n'est pas le cas des composés chimiques responsables de la formation du nuage de colorant final. Chaque halogénure d'argent est sensibilisé à une bande de longueur d'onde spécifique grâce à des colorants sensibilisateurs. Ensuite, les coupleurs colorés, réagissant avec les composés chimiques issus du développement de l'halogénure d'argent, créeront des nuages de colorants produisant l'image finale.

Pour contrôler soigneusement la réponse spectrale d'un film et la quantité d'interdépendance entre chaque couche, les fabricants conçoivent des filtres internes (comme le filtre jaune), des sensibilisateurs colorés (présenté précédemment), des coupleurs intra et inter-couches comme les DIR (Development Inhibitor Releasing)⁷ et même des colorants de masquage⁸. N'étant qu'un intermédiaire dans le processus de création d'image, l'argent métallique développé est retiré lors d'une étape de blanchiment, laissant les nuages de colorant comme seule représentation physique de l'image capturée.

Comme expliqué précédemment, la structure de l'image finale d'un film noir et blanc dépend de la forme et de la taille des cristaux d'halogénure d'argent. Il développe une représentation de l'image capturée sous la forme de filaments d'argent métallique occupant l'endroit initialement occupé par l'halogénure. De son côté, le

⁷ *Couplers in Colour Photography—Chemistry and Function Part 3*

⁸ R.W.G Hunt, *The Reproduction of Colour*, p.340

film négatif couleur crée une image basée sur des nuages de colorant sans rapport avec la forme et la taille du grain d'halogénure d'argent auquel il est associé, mais uniquement sa position. En conséquence, les caractéristiques spatiales du grain (abus de langage désignant les structures élémentaires d'une image argentiques) ne sont pas significativement liées au niveau d'exposition.

La liste des composés chimiques impliqués dans les films actuels n'est pas connue avec certitude, mais des travaux publiés à la fin des années 90 et au début des années 2000 nous donnent une idée globale des technologies et des réactions impliquées dans le processus de création d'images.

Le niveau de complexité chimique et physique affiché dans les articles⁹ souligne que les films sont des technologies chimiques évoluées, sensibles aux entrées du monde réel telles que la température, le gradient chimique, les interdépendances (crosstalk) lumineuses et chimiques et aux considérations photométriques telles que la diffusion de la lumière.

Pour acquérir des données pertinentes sur le film et concevoir une simulation modélisant le grain, le rendu des détails, l'halation et la couleur, il faut considérer une gamme d'expositions étendue. En effet, nous avons, en nous appuyant sur la littérature sur la science des images de la fin des années 70, de bonnes raisons de nous attendre à une forte dépendance entre la réponse du film et le niveau d'exposition¹⁰.

1.2 Traitement des images

Pour bien comprendre le traitement d'image, nous devons le diviser en deux sous-catégories : le traitement couleur et le traitement spatial.

Le traitement des couleurs, comme son nom l'indique, concerne la gestion des couleurs de l'image, de la balance des blancs à la correction colorée, en passant par la conversion de l'espace colorimétrique et l'intention de rendu. Le traitement des

⁹ *Couplers in Colour Photography—Chemistry and Function Part 3*

¹⁰ J.C Dainty and R. Shaw, *Image Science : Principles, Analysis and evaluation of Photographic-Type Imaging Processes*, p.234

couleurs s'appuie principalement sur les valeurs RVB d'un pixel et prend rarement en compte les voisins de ce pixel. Les traitements indirectement liés à la couleur peuvent également être considérés comme faisant partie de cette catégorie, comme la gradation et tout processus modifiant la luminosité et le contraste d'une image.

Le traitement spatial, quant à lui, regroupe tous les processus ayant une influence sur l'emplacement du pixel dans une image. Le filtrage d'images est l'un des sujets majeurs composant le traitement spatial, qu'il soit effectué dans le domaine spatial (convolution) ou fréquentiel (Fourier, ondelettes...). Le traitement spatial est le traitement directement en lien avec le rendu des détails, le bruit et à la compression d'image. Les techniques reposent généralement sur des analyses et des calculs basés sur le pixel et ses voisins ainsi que les attributs de fréquence.

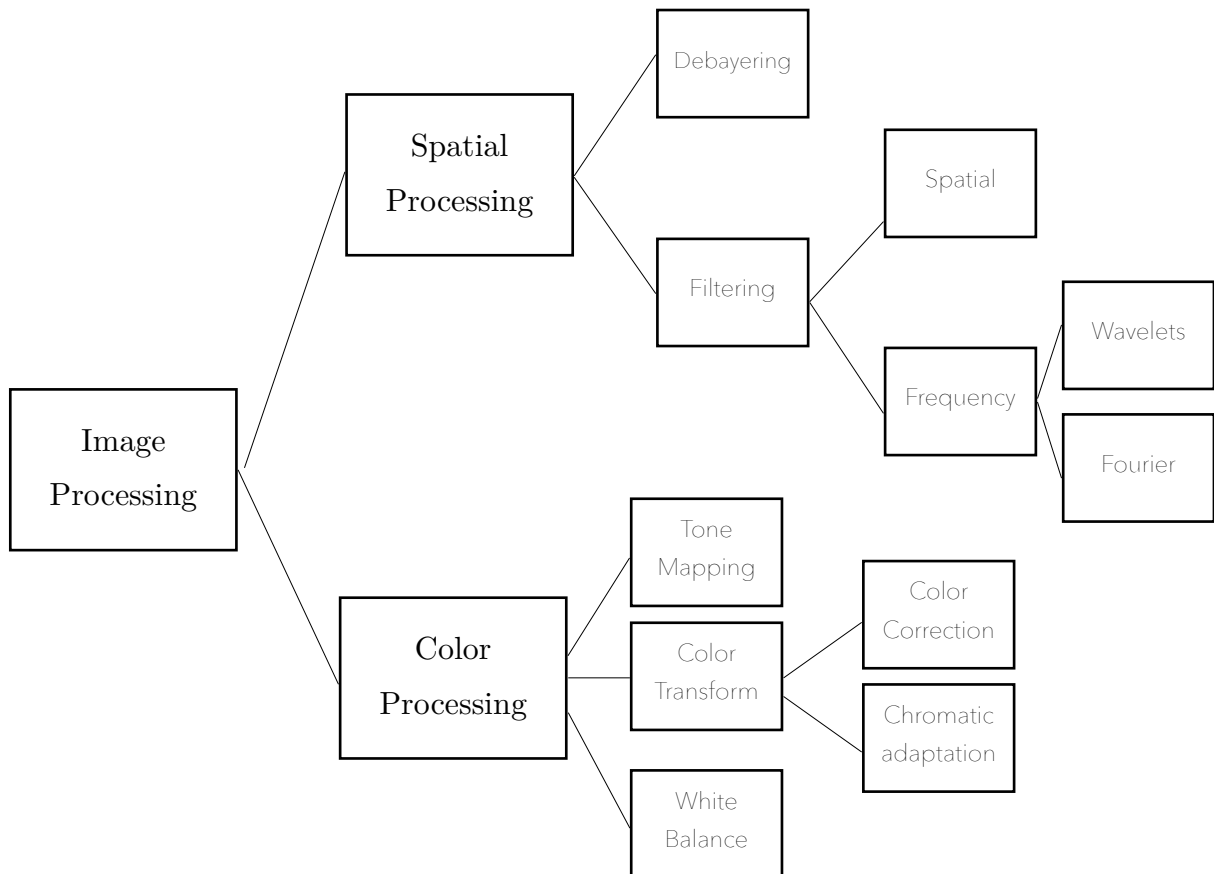


Figure 4 - Vue d'ensemble des processus de traitement d'image (en Anglais)

1.2.1 Traitement des couleurs

Un pipeline de traitement typique, partant des données linéaires (sensor linear) bayerisées jusqu'à l'image projetée, est composé de plusieurs étapes individuelles reposant sur le traitement couleur ou spatial ou parfois les deux combinés.

Les pipelines de développement en photographie et cinéma sont légèrement différents car les données sont utilisées avec des approches et principes distincts dans les deux disciplines. L'industrie de la photographie s'appuie principalement sur des données brutes linéaires bayerisées comme point de départ du pipeline de traitement, le fichier est ensuite équilibré en blanc, débayerisé, corrigé en couleurs avec une matrice, la gradation est ensuite appliquée à partir du signal linéaire et affichés à l'utilisateur. Au cinéma cependant, tout en commençant également avec des fichiers bruts bayerisés, l'utilisateur ne dispose que de quelques étapes du pipeline de traitement. Le signal non étalonné qu'il reçoit est en lien avec la scène (scene referred) et n'a pas été tone mappé ni transformé en couleur pour l'affichage de sortie. En conséquence, une fois la transformation du rendu des couleurs (étalonnage) effectué, la gradation (Tone mapping), la transformation de l'espace colorimétrique et la correction gamma (EOTF inverse) pour l'affichage, sont généralement contenus dans une LUT 3D externe.

Voici le pipeline de traitement typique des images brutes encodées avant d'être projetées.

Balance des blancs

La balance des blancs est l'un des processus les plus simples pouvant être réalisés. Elle consiste à multiplier un signal linéaire par trois facteurs amplificateurs RVB. Les facteurs ont des valeurs différentes selon l'illuminant de la scène capturée.

$$RGB_{out}(x, y) = M_{WB} \times RGB_{in}(x, y) \quad \text{Équation 1.1}$$

$$M_{WB} = \begin{bmatrix} R_{gain} & 0 & 0 \\ 0 & G_{gain} & 0 \\ 0 & 0 & B_{gain} \end{bmatrix} \quad \text{Avec } G_{gain} = 1 \text{ dans la plupart des cas}$$

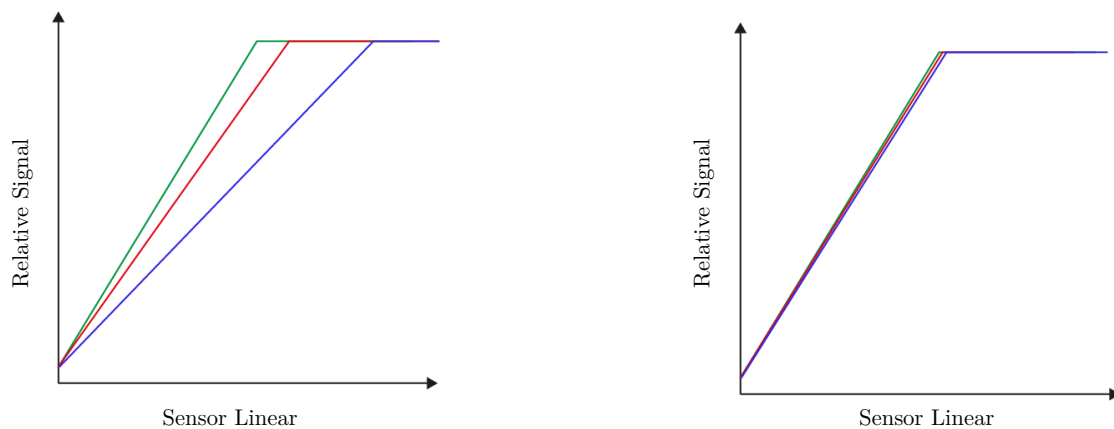


Figure 5 - Balance des Blancs

Dématriçage

Le dématriçage est également défini dans le glossaire de ce mémoire sous la définition de débayerisation. La débayerisation est le processus de dématriçage du CFA (Color Filter Array) au motif de Bayer. Dans la gamme de caméras ARRI, ADA est l'algorithme en charge de cette étape.

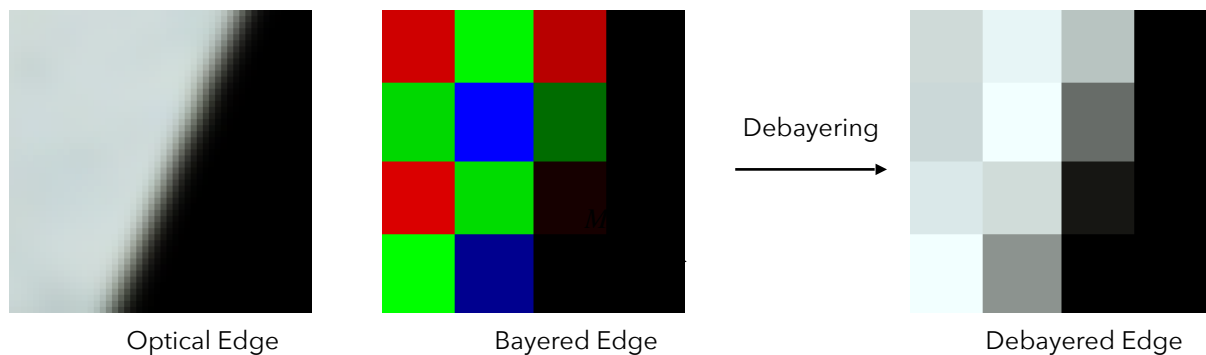


Figure 6 - Schéma de débayerisation

Correction de couleur

La correction des couleurs est généralement gérée par une matrice 3x3. Le principe de correction matricielle des couleurs repose sur l'*hypothèse* que la caméra satisfait la condition de Luther, ce qui signifie qu'une transformation linéaire suffit à corriger sa réponse pour la faire correspondre à l'observateur standard. Cette matrice de correction des couleurs dépend de l'illuminant, même après avoir équilibré les blancs de l'image.

$$RGB_{out}(x, y) = M_{CC} \times RGB_{in}(x, y)$$

Équation 1.2

$$\text{Avec } M_{CC} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}$$

D'autres corrections non linéaires sont possibles avec des matrices de plus grande dimension¹¹ s'appuyant sur des développements polynomiaux qui seront présentés plus tard.

Encodage Logarithmique

Inspirés de la courbe caractéristique du film, les espaces colorimétriques d'encodage logarithmique ont été conçus pour réduire le sur-échantillonnage des hautes lumières dans le signal linéaire. En effet, le dernier stop de lumière capturée avant saturation du capteur prendra la moitié des valeurs de codage linéaire. Pour contrecarrer cet effet et obtenir un signal uniformément réparti, le signal est encodé selon une échelle logarithmique définie par le fabricant de la caméra. Cela permet d'avoir des fichiers avec une profondeur de codage de 12 bits tout en conservant une grande plage dynamique (environ 17 stops pour l'Alexa35). ARRI dispose du LogC4 qui est décrit dans sa datasheet respective¹².

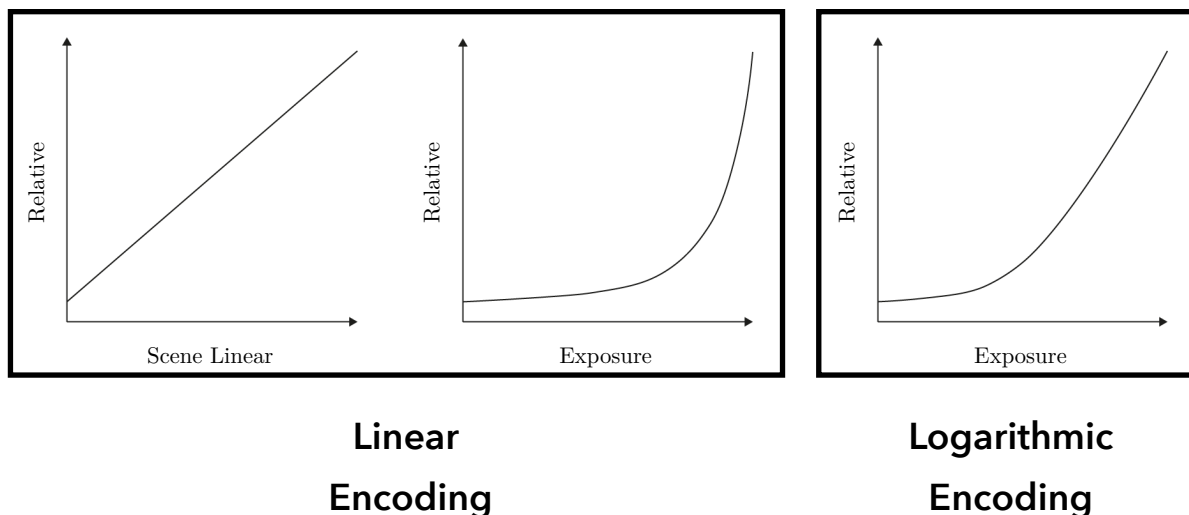


Figure 7 - Principe de codage logarithmique

¹¹ Finlayson, *Color Correction Using Root-Polynomial Regression*

¹² Harald Brendel, Sean Cooper, ARRI LogC4 Logarithmic Color Space Specification
Étude de la texture du film

Tone Mapping¹³

Bien qu'ils présentent un énorme avantage dans le stockage efficace de la scène enregistrée, les espaces log ne répondent pas à nos attentes visuelles en termes de contraste et doivent donc être *tone mappé* en conséquence. En effet, comme les espaces d'encodage du film et du log ont beaucoup en commun, les films négatifs ne constituent pas le support de visualisation final et sont imprimés sur des supports analogiques comme les films positifs destinés à la projection ou le papier photographique RA4. Ces supports ont tendance à avoir une réponse sensitométrique en forme de *S*, augmentant le contraste perçu en écrasant les noirs et les blancs autour d'un point pivot dans les tons moyens. Il ne s'agit pas d'une formule exacte car elle est empirique, mais des tendances, comme le tone mapping en forme de *S*, sont généralement récurrentes.

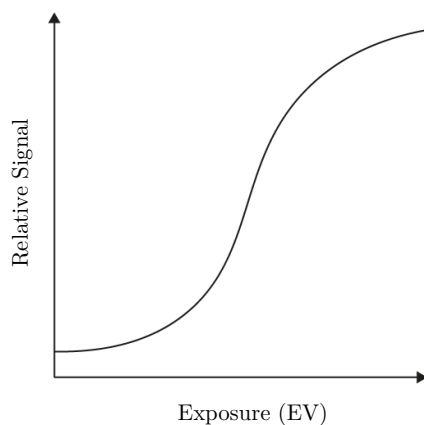


Figure 8 - Tone mapping typique en forme de S

Conversion de l'espace colorimétrique (matrice, LUT)

Cette conversion de l'espace colorimétrique s'effectue de l'espace colorimétrique du log vers l'espace colorimétrique de visualisation. Au cinéma, l'un des espaces colorimétriques les plus utilisés est l'ITU BT 1886 (Rec.709) qui possède les mêmes primaires que le sRGB. La transformation de l'espace colorimétrique est généralement basée sur une matrice déterminée selon l'émission du phosphore (écrans CRT) ou sur les primaires de l'écran (écrans plus modernes)¹⁴.

¹³ R.W.G Hunt, *The Reproduction of Colour*, p47-67

¹⁴ Edward J. Giorgianni, *Digital color management : encoding solutions*, p384

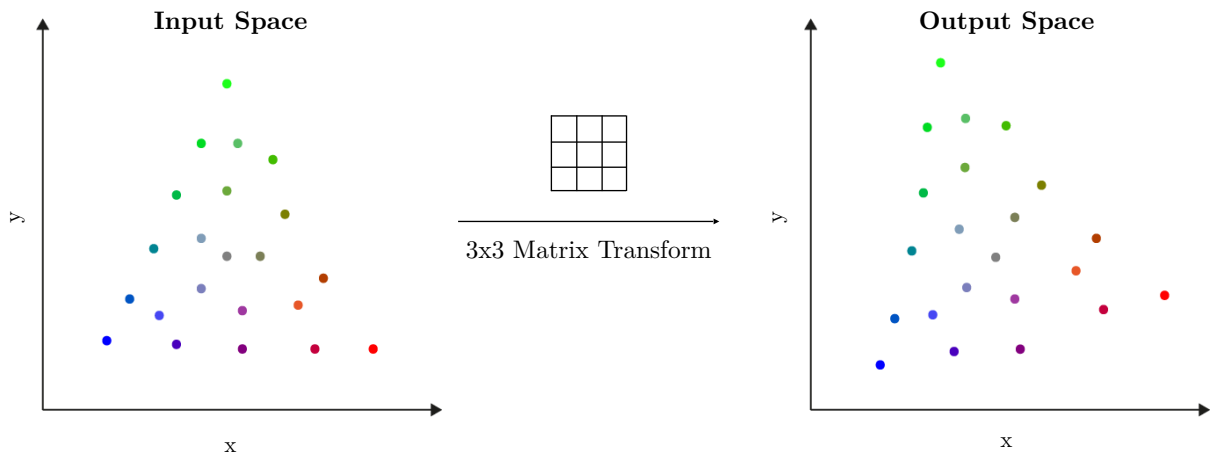


Figure 9 - Transformation de l'espace colorimétrique dans un diagramme de chromaticité

Correction gamma - inverse EOTF

La correction gamma est une transformation appliquée avant d'afficher une image sur un écran physique. La correction gamma a été établie sur la base d'écrans CRT qui ont un EOTF suivant une réponse gamma¹⁵. Même si les écrans ont évolué au cours des 25 dernières années, le codage gamma est resté en place même avec des écrans ayant des réponses linéaires. Cet encodage a été conservé comme standard car il empêche la sous-quantification perceptuelle qui se produirait dans un signal encodé linéaire (ici, l'encodage gamma fonctionne sur un principe similaire à un encodage log).

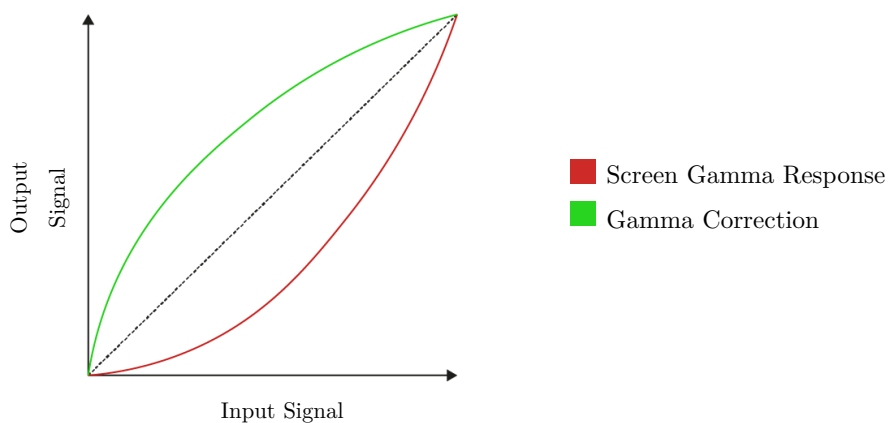


Figure 10 - Courbe encodée en Gamma et sa correction

¹⁵ R.W.G Hunt, *The Reproduction of Colour*, p.50

Voici la courbe d'encodage gamma pour le Rec.709 :

$$S_{Rec709} = \begin{cases} 4.500S_{linear}, & S_{linear} < 0.018 \\ 1.099S_{linear}^{0.45} - 0.099, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Équation 1.3}$$

Avec S_{Rec709} le signal encodé et S_{Linear} le signal linéaire de la scène

1.2.2 Traitement spatial

En plus du pipeline de traitement des couleurs décrit ci-dessus, le traitement spatial prenant en compte le débruitage, le rebruitage, la gestion des détails et tout autre upscaling et downscaling est géré par différents types d'algorithmes basés sur le traitement spatial des images.

Pour avoir une vue d'ensemble de ce domaine, nous devons d'abord introduire le filtrage d'images et ses deux méthodes les plus utilisées qui sont le filtrage de Fourier et les convolutions.

Convolution

La convolution est l'un des principaux moyens de filtrer les images¹⁶. Elle repose sur la définition d'une convolution mathématique bidimensionnelle qui a été discrétisée comme dans l'équation 1.4.

$$f'(x, y) = (f * h)(x, y) = \sum_{i=-\frac{d-1}{2}}^{\frac{d-1}{2}} \sum_{j=-\frac{d-1}{2}}^{\frac{d-1}{2}} f(i - n, j - m) \times h(n, m) \quad \text{Équation 1.4}$$

Avec f' : Image filtrée, f : image d'entrée et h : kernel de filtrage carré de taille impaire d .

Si la formule est intimidante, la représentation visuelle d'une convolution est simple et peut être expliquée par ce schéma.

¹⁶ J.C Dainty and R. Shaw, *Image Science : Principles, Analysis and evaluation of Photographic-Type Imaging Processes*. p.190-231

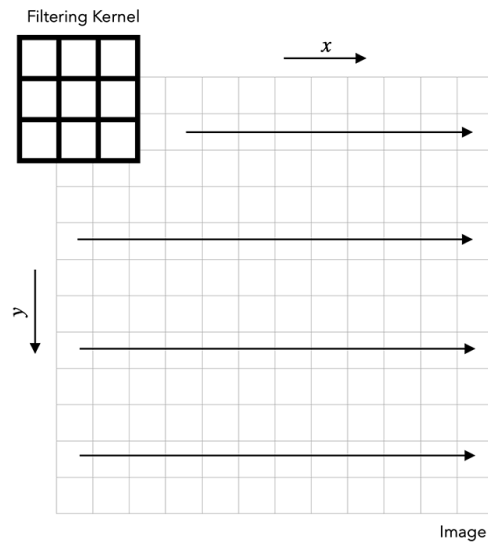


Figure 11 - Principe de convolution

L'image filtrée recevra alors la valeur calculée comme la somme des multiplications des valeurs de l'image d'entrée et du kernel de filtrage. Voici quelques exemples de kernels 3x3

0	0	0
0	1	0
0	0	0

Identity Filtering

$\frac{1}{9} \times$

1	1	1
1	1	1
1	1	1

Box Blur

$\frac{1}{16} \times$

1	2	1
2	4	2
1	2	1

Gaussian Blur

0	-1	0
-1	5	-1
0	-1	0

Sharpening Filter

Filtrage de Fourier

Le filtrage de Fourier¹⁷ est un équivalent de la convolution dans le domaine spatial mais transposé dans le domaine fréquentiel. En domaine fréquentiel, l'image est décomposée en niveaux de fréquence sur la base d'une décomposition de Fourier.

Transformée de Fourier discrète

$$DFT(x(n, m)) = \frac{1}{N \times M} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} x(n, m) e^{-2i\pi(\frac{un}{N} + \frac{vm}{M})}$$

Équation 1.5

Transformée de Fourier inverse discrète

¹⁷ J.C Dainty and R. Shaw, *Image Science : Principles, Analysis and evaluation of Photographic-Type Imaging Processes*. p.190-231

$$DFT^{-1}(X(n, m)) = \frac{1}{N \times M} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} X(n, m) e^{2i\pi(\frac{un}{N} + \frac{vm}{M})} \quad \text{Équation 1.6}$$

On peut noter que la transformée de Fourier d'une image est un nombre complexe composé d'une partie réelle et d'une partie imaginaire.

NB : Les transformées de Fourier discrètes DFT seront notées \mathcal{F} dans la suite du mémoire par souci de simplification.

L'équation définissant la relation entre la convolution et le filtrage de Fourier est globalement définie comme suit

$$(f*h)(x, y) = \mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(f) \times \mathcal{F}(h))(x, y) \quad \text{Équation 1.7}$$

1.2.3 Métriques et concepts spatiaux

Comme on peut l'imaginer, la texture concerne principalement l'apparence physique d'une image (et pas vraiment ses couleurs), elle s'appuie fortement sur le traitement spatial. Les domaines de Fourier et spatiaux peuvent être choisis pour représenter les mesures et les comportements de manière plus pertinente. Dans la section suivante, nous tenterons de comprendre le lien entre le filtrage avec convolution et les fonctions de transfert de modulation. Nous présenterons également le lien entre le filtrage du bruit et Noise Power Spectra (NPS ou Densité Spectrale de Bruit).

Fonction de transfert de modulation¹⁸ ou MTF

Le calcul de la fonction de transfert de modulation vise à caractériser la transmission des fréquences de notre système opto-électronique. Semblable au son, défini par des fréquences temporelles, la photographie échantillonne l'espace comme un ensemble de fréquences spatiales. En gardant l'analogie sonore, lorsque nous voulons évaluer la réponse en fréquence d'un système acoustique donné, nous envoyons un bruit blanc contenant toutes les fréquences avec une énergie égale à travers notre système sonore.

¹⁸ J.C Dainty and R. Shaw, *Image Science : Principles, Analysis and evaluation of Photographic-Type Imaging Processes*, p.232-275

La modulation de ce signal équi-énergétique définit la réponse fréquentielle de notre système. Lorsque l'on considère la photographie et les systèmes optoélectroniques, les objets contenant toutes les fréquences à énergie égale sont de petits points, des lignes fines et des bords nets (sharp edges). En conséquence, pour avoir une idée de la réponse fréquentielle de notre système, nous devons capturer l'image de l'un de ces objets. Lorsque nous faisons une MTF, nous devons être conscients que nous mesurons l'ensemble du système avec son objectif, son filtre passe bas (OLPF), sa pile optique et son traitement d'image (debayerisation, filtrage spatial...).

Voici un exemple des éléments opto-chimiques-électriques qui influencent la réponse en fréquence/MTF du pipeline d'imagerie cinématographique.

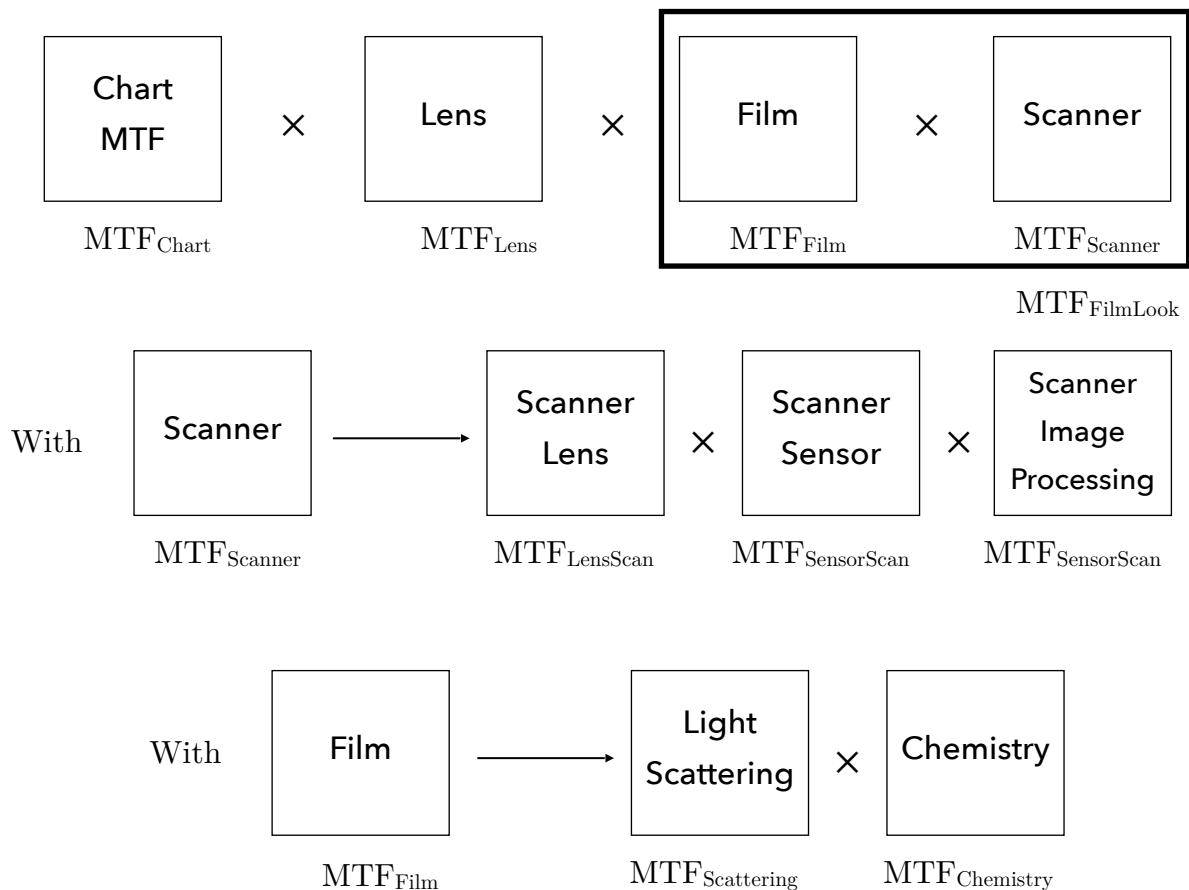


Figure 12 - Principe du produit MTF

Pour présenter les principes partagés entre kernels de convolution et MTF, nous pouvons illustrer cela avec les exemples suivants.

Il existe deux manières de récupérer la réponse en fréquence ou MTF de notre système. L'une consiste à calculer la réponse en fréquence de notre kernel de filtrage

en le rembourrant (padding) à la résolution appropriée et en prenant sa transformée de Fourier, l'autre repose sur la « fonction d'étalement d'un bord » (Edge spread function ou ESF) d'un bord filtré, la dérive et calcule la transformée de Fourier de cette dérivation.

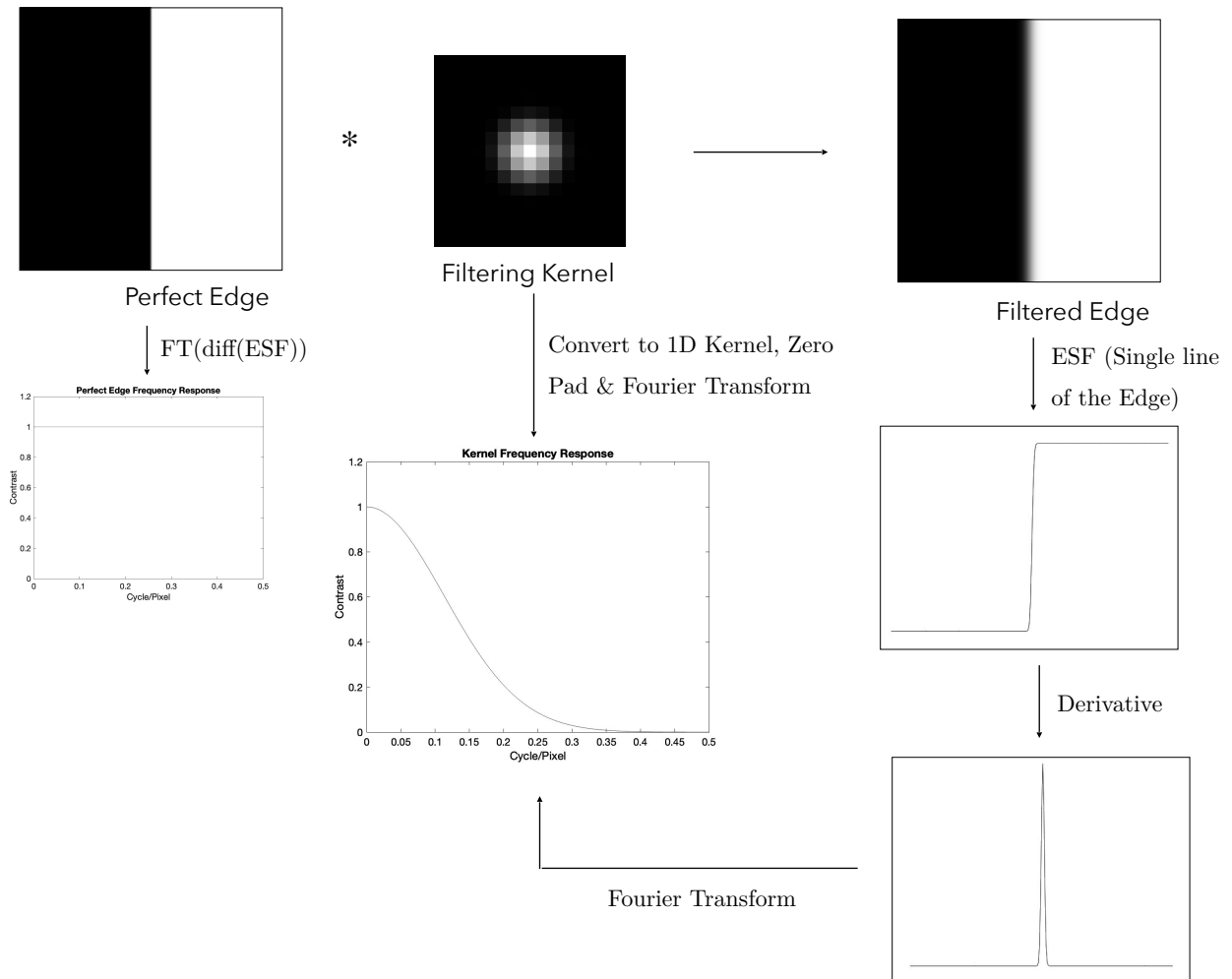


Figure 12 - Principe de calcul MTF

NB : Sur la figure 12, 'Transformée de Fourier' représente la valeur absolue (le module) de la transformée de Fourier.

Densité Spectrale de Bruit¹⁹ ou NPS

Avec un principe similaire à la MTF, le NPS donne des informations sur les caractéristiques fréquentielle du bruit analysé. Semblable à un bord net ou à une ligne fine contenant toutes les fréquences à puissance égale, le bruit blanc ou bruit non filtré contient également toutes les fréquences à puissance égale.

Pour connaître la réponse en fréquence également directement lié à la matrice de corrélation spatiale (AutoCorrelation) d'un bruit donné, nous avons également deux manières différentes de procéder. Une solution consiste, comme présenté dans la section MTF, à prendre un kernel rembourré (padding) et à calculer sa transformée de Fourier pour récupérer sa corrélation spatiale.

La seconde consiste à calculer la matrice d'autocorrélation du bruit filtré et à prendre la transformée de Fourier de cette matrice. Pour être un peu plus précis, la réponse en fréquence peut être entièrement récupérée lorsque l'autocorrélation est au carré avant d'appliquer la transformée de Fourier ou que la transformée de Fourier soit à la racine carrée.

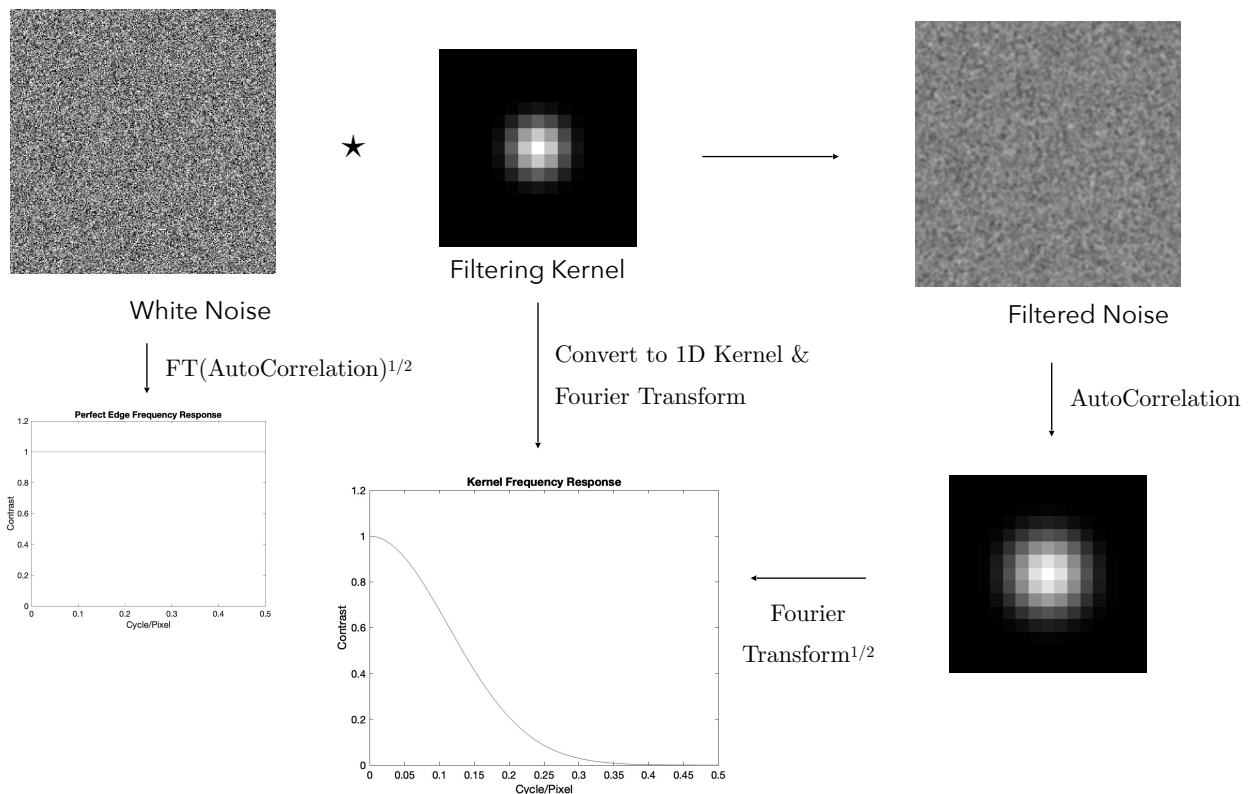


Figure 13 – Principe de calcul du pseudo NPS

¹⁹ J.C Dainty and R. Shaw, *Image Science : Principles, Analysis and evaluation of Photographic-Type Imaging Processes*, p.222, le NPS y est fait référence sous le nom de Wiener Spectrum

1.3 Connaissances actuelles en matière de synthèse de textures

Grain

Le grain est le plus étudié des trois ingrédients identifiés comme faisant partie de la texture du film. Nous pouvons même identifier plusieurs méthodes d'ajout de grain film, des plaques de grains scannées les plus simples jusqu'aux simulations complètes basées sur des phénomènes physiques et statistiques²⁰.

Le grain du film est l'essence même de l'attribut matériel du film, car il repose sur les cristaux physiques utilisés pour capturer la lumière. De plus, le grain du film est modifié à la fois par l'épaisseur de la base du film ainsi que par la stratification de l'émulsion sensible. Lorsque les données finales de la pellicule sont numérisées par un scanner ou dupliquées par un dispositif d'impression par contact, les caractéristiques optiques de l'objectif et/ou du capteur sont concaténées dans le film lui-même.

Corrélation des signaux

Le film étant un dispositif de capture de la lumière, le support est intrinsèquement affecté par le bruit photonique (ou bruit de grenaille, shot noise en anglais). Ce bruit est inhérent à la lumière et suit une distribution de Poisson. À des signaux suffisamment élevés, ce bruit suit généralement une distribution gaussienne²¹. Le bruit photonique est en effet corrélé au signal et augmente linéairement avec l'exposition.

De plus, les halogénures eux-mêmes ont un bruit inhérent intégré à leur réaction à la lumière. Suivant une distribution de Poisson à faible intensité, elle peut être simplifiée par une distribution gaussienne à des expositions plus élevées. Le bruit du film augmente selon une fonction racine carrée (film N&B) dans un domaine logarithmique (densité optique)²².

²⁰ A Newson, Julie Delon, B Galerne. *A Stochastic Film Grain Model for Resolution-Independent Rendering*.

²¹ Andrews, Harry C, *Digital image restoration*, p.21

²² Andrews, Harry C, *Digital image restoration*, p.21

Corrélation spatiale

Les halogénures d'argent, une fois réduits par le révélateur, forment de minuscules sphères ou filaments d'argent métallique. Il convient de noter à ce stade que même si la taille de la sphère ou du filament est corrélée à la taille de l'halogénure d'argent (en termes de limite), de nombreux autres paramètres influencent la taille et la forme de l'argent obtenu, comme la diffusion chimique, l'agitation du développement et composition du bain de développement. De plus, pour les films couleur, la structure élémentaire de l'image finale est encore plus éloignée de son halogénure en raison de la plus grande complexité impliquée dans la création des nuages de colorant et donc dans l'image résultante. Aussi individuellement que les nuages de filaments/colorants d'argent résultants peuvent être décrits, une corrélation spatiale provoquée par l'effet de voisinage du développement (acutance) dû au gradient local de concentration chimique ainsi qu'aux échanges électroniques entre ces sites est observée.

Indépendamment du film et de la corrélation apportée par l'exposition et la chimie, le dispositif utilisé pour imprimer ou numériser le film façonnera la corrélation spatiale de sortie du grain. La réponse en fréquence de sa lentille et/ou de son capteur sera concaténée dans la corrélation spatiale des grains du film. Enfin, toujours en tenant compte le dispositif de numérisation/duplication, la géométrie de la source lumineuse utilisée par un tel dispositif pour éclairer le film est d'une grande importance. En effet, l'utilisation d'une source de lumière condensée apportera un effet Callier²³ augmentant ainsi la netteté et la puissance du grain tandis que l'utilisation d'une source de lumière diffuse adoucira le grain tout en diminuant sa puissance.

La corrélation spatiale du grain du film sera évaluée dans des images scannées, ce qui entraînera une quantification spatiale des mesures (ici en pixel).

Corrélation des couleurs

La corrélation des couleurs dans le grain du film peut s'expliquer par la structure du film et plus particulièrement par la façon dont il est disposé en couches empilées les unes sur les autres. Par conséquent, lorsque le film est exposé à la lumière, les couches situées au-dessus de la pile optique auront un impact sur les couches situées en dessous (principalement en raison de la diffusion de la lumière par les cristaux

²³ R.W.G Hunt, *The Reproduction of Colour*, p.222

d'halogénure d'argent et de la diffusion chimique). De plus, et c'est probablement le plus important des deux, une fois développé, numérisé ou dupliqué, un film sera lu avec une lumière passant à travers sa pile optique et révélant ainsi des effets d'ombre et d'occlusion entre les différentes couches. Tous combinés, ces effets créeront un signal de bruit corrélé entre chaque couche de couleur à un niveau spatio-coloré.

Pour résumer, le grain du film est corrélé à trois niveaux différents qui doivent être mesurés et reproduits de manière adéquate pour obtenir une synthèse de grain appropriée. L'une de ces corrélations dépendra fortement du contenu de l'image (corrélation du signal), tandis que les deux autres dépendront principalement de la structure physique du film lui-même.

Rendu de détail

Le rendu des détails est un aspect de l'émulation du film qui reste pour l'essentiel peu abordé dans les synthèses actuellement disponibles. Nous avons remarqué que mesurer la MTF d'un film était difficile en raison du manque d'outils dédiés pour mesurer ses caractéristiques et du niveau de bruit élevé rencontré dans un film. Hormis le filtrage flou apparent qui peut être réglé manuellement par l'utilisateur, il n'y a aucune trace de filtrage réel basé sur de telles mesures. Le rendu des détails sera considéré comme une combinaison d'effets physique et chimique : la diffusion de la lumière dans l'émulsion provoquant un flou et le gradient chimique²⁴ de la concentration du développeur provoquant un effet de bord (acutance) et donc de sensation de netteté.

Halation

L'halation est une autre caractéristique avec peu de recherche ou documentation significative. Les principes impliqués dans cet effet sont quelque peu connus, mais rarement clairement définis, explicités et mesurés. Les outils existants émulant l'halation s'appuient sur les entrées manuelles de l'utilisateur et se basent donc sur la représentation de l'halation qu'à l'utilisateur, mais sur aucune mesure objective. En conséquence, cette flexibilité peut conduire à des résultats irréalistes lorsqu'il s'agit

²⁴ J.C Dainty and R. Shaw, *Image Science : Principles, Analysis and evaluation of Photographic-Type Imaging Processes*, p.237-238

d'émuler fidèlement un film donné. Des paramètres tels que la quantité, le seuil, la taille et l'atténuation sont pertinents pour les choix esthétiques mais ne sont pas fidèles à une pellicule donnée.

1.4 Appareil photo numérique - ARRI Alexa 35

L'Alexa 35 est une caméra ARRI sortie en 2022 et a introduit un nouveau pipeline de traitement des couleurs appelé REVEAL, un nouvel espace colorimétrique (AWG4), une nouvelle courbe d'encodage (LogC4) ainsi qu'une nouvelle fonctionnalité appelée Texture permettant aux cinéastes de contrôler les attributs spatiaux de leur image en modifiant le bruit et la netteté .

L'Alexa 35 est dotée d'un capteur 4,6K 3:2 et possède une excellente plage dynamique atteignant 17 stops. Les ARRI Signature Primes sont les objectifs qui ont été privilégiés pour acquérir des données avec l'Alexa 35.

Le pipeline de traitement utilisé dans la caméra est similaire à celui décrit dans la section 1.2.

1.5 Scanner de films - ARRISCAN XT

Pour numériser le film que nous avons exposé, nous avons utilisé un ARRISCAN XT. Il s'agit de la deuxième génération de scanners ARRI. Il est conçu pour faire avancer mécaniquement le film à travers deux porte film (gate) de 35 mm ou 16 mm. Le capteur monochromatique est un Alev3 sans CFA équipé d'un objectif macro Zeiss. Grâce au capteur monochromatique, l'éclairage est composé de trois jeux de LED couvrant les plages spectrales du rouge, du vert et du bleu. Pour obtenir une surface éclairée homogène, la source lumineuse est diffusée avec une sphère d'intégration. Comme le capteur Alev3 ne fait que 3,4K, le scanner peut effectuer un demi-décalage de pixels (pixel shift) pour obtenir le double de la définition native du scanner (6,8K) au prix d'une vitesse de numérisation réduite.

Comme pour la plupart des scanners ou appareils d'imagerie, la caractérisation de sa réponse optoélectronique est essentielle pour obtenir des résultats cohérents et

reproductibles. L'ARRISCAN XT n'est pas différent car il est calibré avec un ensemble donné de pellicules (Fujifilm et Kodak) pour obtenir des résultats appropriés et définis en termes de colorimétrie et de reproduction tonale.

De plus, lorsque aucun film n'est chargé, le scanner est calibré avec une linéarisation du capteur et une homogénéisation numérique de l'éclairage.

Une calibration du film s'appuyant sur une soustraction du support+voile est effectué en ajustant le niveau des canaux RVB de l'éclairage LED.

Comme mentionné ci-dessus, les informations de couleur sont obtenues à partir d'un ensemble de LED RVB. Même si l'émission spectrale des LED ne peut pas être représentée dans ce mémoire, nous pouvons émettre, avec confiance, l'hypothèse de l'utilisation de LED RVB à bande étroite qui sont proches des densités maximales de l'ensemble de colorants de films négatifs courants. Ce principe de mesure aux niveaux des pics de densités dans les couches cyan, magenta et jaune est également celui adopté par les standards sensitométrique tel que le Status M ainsi que le SMPTE Printing Densities.

Pourtant, bien que le spectre d'émission des LED RVB se rapproche de la réponse spectrale du statut M ou des Printing Densities, ils ne sont pas strictement identiques. En conséquence, pour corriger correctement les numérisations sortant du scanner, des matrices de correction des couleurs sont calculées en se basant sur des mesures de film. Chaque valeur est mesurée spectralement et intégrée par les trois normes de mesure les plus courantes, à savoir StatusM, SMPTE Printing Densities et APD²⁵ (ACES Printing Densities). Avec ces valeurs intégrées, une correction des couleurs basée sur une matrice 3x3 est optimisée pour réduire les écarts de couleurs entre l'entrée (RGBScan) et la sortie (StatusM, Printing Densities ou APD). Cette correction des couleurs se produit dans un domaine encodé de densité de numérisation (domaine logarithmique avec un encodage similaire à celui de Cineon).

²⁵ SMPTE, SMPTE ST 2065-2:2020, *Academy Printing Density (APD) - Spectral Responsivities, Reference Measurement Device and Spectral Calculation*

L'ADX10²⁶, bien qu'ayant une définition différente (basée sur APD, voir les équations 1.10), a des bases communes avec l'encodage Cineon. Tous deux sont des systèmes de codage logarithmique utilisant la définition de densités optiques. Le capteur enregistre les données linéaires du film négatif qui correspondent à sa transmission. La densité optique, quant à elle, est définie dans l'équation 1.8. L'encodage de densité pour l'ARRISCAN XT est basé sur le Cineon et est défini dans l'équation 1.9.

$$D = \log(O) = -\log(T) \text{ avec } O = \frac{1}{T} \quad \text{l'équation 1.8}$$

Encodage de densité des images brutes de ARRISCAN XT

Pour $C \in [R, G, B]$ et $[R, G, B] \in [0,1]$

$$\boxed{Cineon_C = -\log_{10}[MAX[C, 0.00001] \times CinGain + Offset]} \quad \text{Équation 1.9}$$

$$\text{Où } CinGain = \frac{GainVar}{500.0}, Offset = \frac{BaseVar + \log_{10}(k \times GainVar)}{1024}$$

Définition ADX comme donnée dans le Standard SMPTE Équations 1.10

$$ADX_{Red} = MAX[0, MIN[1023, ROUND[1.00 \times (APD_R - APD_{RDmin}) \times 500 + 95]]]$$

$$ADX_{Green} = MAX[0, MIN[1023, ROUND[0.92 \times (APD_G - APD_{GDmin}) \times 500 + 95]]]$$

$$ADX_{Blue} = MAX[0, MIN[1023, ROUND[0.95 \times (APD_B - APD_{BDmin}) \times 500 + 95]]]$$

$$\text{Où } APD_C = -\log_{10} \left[\frac{1}{\prod_{sum,c}} \sum_{\lambda} \prod_{\lambda,c} \times T_{\lambda} \right] \text{ et } C \in [R, G, B]$$

T_{λ} : Transmittance spectrale de l'échantillon mesuré (film) à une longueur d'onde donnée

$\prod_{\lambda,c}$: Réponse spectrale de \prod_{APD} par canal (RVB)

²⁶ SMPTE, SMPTE ST 2065-3:2020, *Academy Density Exchange Encoding (ADX) Encoding Academy Printing Density (APD) Values*

2 - Acquisition des données

Cette section décrit les protocoles utilisés pour acquérir les images nécessaires à l'extraction des données d'un film analogique.

Chaque caractéristique de texture nécessite une configuration et des tests spécifiques pour être extraite des images capturées. De plus, les domaines d'encodage et espaces colorimétriques doivent être correctement définis car ils ont un fort impact sur les caractéristiques de la texture.

2.1 Sensitométrie

La dépendance des caractéristiques du film à l'exposition a été l'une des principales hypothèses de ce mémoire. Certains attributs du film, comme le rendu des couleurs, qui ont été étudiés dans un travail précédent ce mémoire, montraient déjà des comportements non linéairement liés au niveau d'exposition. De plus, tous les appareils d'imagerie sont victimes du bruit photonique. De ce fait, nous avons décidé d'acquérir des données en tenant compte de cette contrainte. Chaque ensemble de données contient des rampes d'exposition de 18 stops avec une répartition des stops au-dessus et en dessous du gris à 18 % basée sur la norme ISO présentée ci-dessous.

La norme ISO²⁷ déterminant la sensibilité des films négatifs couleur demande la moyenne de la sensibilité de la couche verte et de la couche la plus lente en fonction de leur logH, comme dans l'équation 2.1 (H étant la lamination en lux.s). Ces logH représente le niveau de lamination nécessaire pour générer 0,15D au-dessus de la Dmin. Pour répondre à la norme ISO, le film est censé atteindre un gamma de 0,6.

$$\log_{10}H_m = \frac{\log_{10}H_G + \log_{10}H_{SlowestLayer}}{2} \quad \text{Équation 2.1}$$

²⁷ ISO 5800:1987, Photography, Colour negative films for still photography Determination of ISO speed

$$S = \frac{\sqrt{2}}{H_m}$$

Bien que l'obtention du point de vitesse donne une idée de limite inférieure pour le bracketing de notre film, nous avons besoin d'une définition du point gris à 18% qui nous permettra de linéariser notre film efficacement. On se rend compte en étudiant les équations des photomètres Sekonic ou Minolta que le gris 18% est fixé à environ $3_{2/3}$ EV au-dessus du point de vitesse.

Avec ces informations à l'esprit, nous pouvons exposer nos films avec une plage d'exposition de 18 stops pour mesurer la réponse du film du support plus voile jusqu'à la saturation. 18 stops est l'étendue retenue car elle couvre l'étendue utile de l'Alexa 35 et aussi parce qu'elle correspond à la moitié d'un rouleau de film de 36 poses 135. En nous appuyant sur ce qui vient d'être dit, nous avons décidé de mettre 6 stops (4 jusqu'au point de vitesse et 2 pour couvrir le pied de courbe) en dessous du gris à 18% et 11 au-dessus.



Figure 14 - Plage d'exposition et répartition des stops pour un film argentique

2.1.1 Linéarisation du Film

La linéarisation du film était, d'une manière ou d'une autre, une condition préalable à toutes les étapes d'analyse. Par exemple, la linéarisation pour l'analyse du grain ne semblait pas nécessaire à première vue, mais en raison de la dépendance de l'apparence du grain à l'espace colorimétrique considéré, nous avons linéarisé le film pour effectuer une transformation du film vers l'espace colorimétrique LogC4. Pour l'analyse du RoD et de l'Halation, le signal doit être linéarisé avant de calculer la MTF du film.

Avec le gamma recommandé de 0,6, sachant que le point de vitesse est situé à 0,15D au-dessus du support+voile, et que le gris 18% se situe environ à $\frac{2}{3}$ stops au-dessus du point de vitesse, on peut dire que le gris 18% correspond à une densité d'environ 0.8D .

Plus précisément et de manière normée, en se référant aux valeurs LAD (Laboratory Aim Density) Kodak données dans leur *Digital Recorder Calibration*²⁸, la cible de gris de 18 % est définie pour une valeur Cineon de 445 (en 10 bits). Sur film négatif (50D dans le document Kodak), la densité obtenue au-dessus du support plus voile est d'environ 0,7D en StatusM selon la couche, mais exactement de 0,7D en Printing Densities. De plus, dans le fichier CTL ADXToAP0 d'ACES, le gris moyen est également évalué à 0,7D²⁹. Ce sera donc notre référence pour ajuster le point gris dans notre algorithme de linéarisation.

NB : 0,7D n'est pas la mesure que nous souhaitons dans notre procédé qui se base sur des valeurs relatives ADX10. Le point gris sera alors défini comme

$$GP = \frac{0.7D * CinGain + 95}{1023} \quad \text{Équation 2.2}$$

2.1.2 Exposition

Exposer une surface sensible à la lumière, qu'il s'agisse d'un film photographique ou d'un capteur, est un défi. En argentique, la sensibilité à la lumière est décrite comme la quantité de lumière nécessaire pour produire une densité cible haut dessus du support plus voile (Equation 2.1). ARRI utilise une échelle EI (directement basée sur l'échelle de sensibilité standard ISO³⁰) définie par la valeur de gris de 18 %. À mesure que la sensibilité augmente, la répartition des niveaux de gris supérieurs et inférieurs à 18 % est décalée (plus la sensibilité est élevée, plus le nombre de niveaux de gris

²⁸ KODAK Publication No. H-387, *KODAK Digital LAD Test Image, User's Guide and Digital Recorder Calibration and Aims*,

²⁹ ACES ADXToAP0 CTL file on [GitHub](#)

³⁰ ISO 12232:2019, Photography - Digital still cameras - Determination of exposure index, ISO speed ratings, standard output sensitivity, and recommended exposure index

disponibles est élevé)³¹. Cela implique qu'il existe une sensibilité matérielle unique et que des sensibilités supplémentaires sont créées en modifiant la courbe d'encodage du journal en fonction de l'entrée de l'utilisateur (ou des métadonnées) du logiciel.

2.2 Plaques de grains - Grain Plate (Flat Field)

Le grain d'un film peut être mesuré lorsqu'une surface uniformément éclairée avec un éclairage correctement équilibré est photographiée. Pour mesurer la corrélation spatiale du grain, la surface utilisée pour créer ces plaques doit être sans texture. Compte tenu de ces contraintes, une sphère d'intégration est une excellente candidate pour accomplir cette tâche. Comme les caractéristiques du grain varient en fonction de l'exposition, nous prendrons plusieurs images sur une plage d'exposition de 18 valeurs.

Comme cela sera expliqué dans la section 3, les plaques de grains doivent être soigneusement converties dans le bon espace colorimétrique avant l'analyse, car leurs caractéristiques changent radicalement avec les conversions d'espace.

2.3 Fente inclinée

La méthode de la fente inclinée peut être considérée comme une méthode à double bord incliné³² (Slanted Edge). Cela permet d'obtenir le double de la longueur du bord en une seule prise de vue. Cela aide énormément à la mesure de MTF car le film est vraiment bruité (très granuleux), ce qui conduirait à une MTF inexacte, voire inutilisable. Le bord incliné permet de mesurer le rendu des détails et l'halation d'un film donné.

Même si le bord incliné est couramment utilisé en photographie numérique pour mesurer la MTF des objectifs, la méthode est rarement utilisée en argentique et encore moins pour caractériser l'halation.

³¹ ARRI, ALEXA 35 *Software Update Package 1.2 User Manual*, p.41

³² Estrideau, Magali, et Pierre Magnan. *Fast MTF Measurement of CMOS Imagers Using ISO 12333 Slanted-Edge Methodology*

Avec les principes de base de la MTF, nous pouvons déconvoluer la MTF de l'optique de la MTF du Film concaténée avec cette même MTF de l'optique, ensemble que nous obtenons de l'ARRISCAN (la MTF du scanner est considéré comme faisant partie de la texture du film). Cependant, la MTF ne prend pas en compte le flare et autres aberrations optiques qui seront présentes dans la mesure. En conséquence, nous avons décidé d'essayer d'obtenir un bord incliné sans lentille en générant un ombre avec une lame de rasoir directement en contact avec le film. Après des pré-tests montrant des phénomènes de diffraction générés par la lame de rasoir, nous avons pensé qu'ils n'étaient visibles qu'à cause de l'écart important entre la lame de rasoir et le capteur (situés à environ 5 cm l'un de l'autre). Pourtant, même en étant presque directement en contact avec le film (à environ 100 μm , ce qui correspond à la moitié de l'épaisseur d'une lame de rasoir), il y avait toujours un effet de diffraction notable qui n'était pas adapté pour mesurer avec précision la MTF du film. Par ailleurs, des tests de simulation (voir Figure 15) basés sur la diffraction en lame de couteau nous ont donné des résultats disqualifiant complètement la méthode pour la mesure de la MTF (Dépassement sur le côté clair du bord et « flare » polluant le côté le plus sombre du bord (voir plus d'information en Annexe 1)).

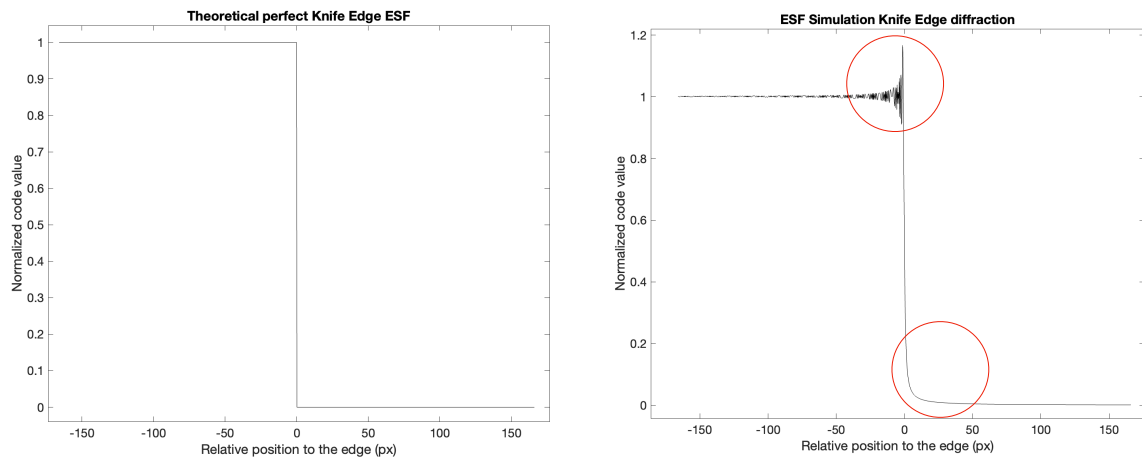


Figure 15 - Simulation théorique de l'ESF et de la diffraction en lame de couteau

La lame de rasoir n'ayant pas donné de résultats concluants, nous avons décidé d'utiliser une méthode classique avec un système reposant sur un objectif et une charte contenant une fente inclinée. Comme mentionné ci-dessus, cette méthode

présente des aberrations apportées par l'optique, visibles sur les expositions plus élevées. Cependant, nous avons jugé la méthode de mesure comme suffisante et les aberrations optiques non gênantes car n'influant pas les résultats MTF.

Parce qu'il est difficile d'obtenir une mise au point critique avec un appareil photo argentique, nous avons décidé d'utiliser l'appareil photo numérique comme outil de mise au point. Pour obtenir un système d'appareils photo pouvant être à la fois numériques et analogiques, nous avons décidé d'utiliser des appareils photo Nikon, la marque n'ayant pas changé de monture d'objectif dans les années 2000 lorsqu'ils sont passés en numérique.

Parce que nous étions conscients des divergences potentielles de focalisation entre les deux supports, nous avons commencé à évaluer la différence de position entre l'appareil analogique et le numérique. Nous avons verrouillé la bague de mise au point de notre objectif à 70 cm et avons décidé de faire la mise au point de l'appareil photo en le déplaçant sur un banc optique micro-gradué. Un bracketing de position a été réalisé avec la caméra numérique et analogique (chargée d'un film noir et blanc). Pour évaluer la mise au point critique, les images de la fente inclinée capturée ont été traitées pour en extraire les MTF. Des tracés montrant les MTF₅₀ (calculé sur le canal RVB moyen) en fonction de la position par rapport à la charte ont été réalisés et nous ont permis d'évaluer la distance séparant la position des plans de netteté entre les deux supports (Voir Figure 16).

À ce stade, les MTF ont été calculées avec le programme sfrmat5 qui s'appuie sur la détection des contours. Cela nous a donné des résultats bruités mais fiables pour l'évaluation de la mise au point de la caméra analogique. Vous trouverez tous les tracés MTF (par exposition) pour les deux supports en Annexe 2.

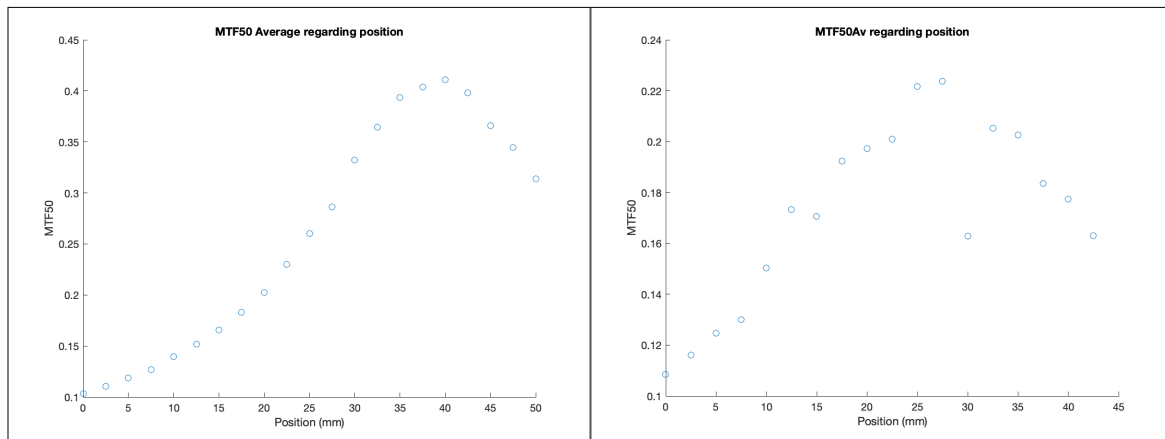


Figure 16 - MTF50 concernant la position - Numérique et Film

L'appareil photo numérique a été utilisé pour positionner correctement la plaque de montage sur le banc optique puis, la distance de décalage (évaluée à 15mm) calculée la veille a été appliquée à l'appareil photo argentique. La fente inclinée a été capturée selon une étendue de 18 stops par incréments d'un stop pour obtenir des informations de RoD et d'Halation sur toute la plage d'exposition.

Les films ont été développés dans une chaîne de traitement ECN-2 et numérisés avec un ARRISCAN XT. Les scans sont effectués avec une résolution de 6K sous-échantillonnées en 4K, filtrés par le filtre numérique OCN2 réglé sur 0 flou et 0 netteté. Le scanner offre la possibilité d'obtenir des séquences non sous-échantillonnées ni filtrées, mais il a été choisi de s'en tenir à ce que les utilisateurs pourraient utiliser lors d'une numérisation de film classique. De plus, il a été observé que l'écart type des structures de grains les plus fines dépasse 0,5 pixel, ce qui nous indique que nous pouvons largement récupérer toute information nécessaire du film.

De plus, et pour mettre les choses en perspective, à une résolution 4K pour un film 35 mm (24 mm de large), le scanner possède un pas d'échantillonnage de $6e-3$ mm/px, ce qui donne une résolution de 166,6 px/mm qui se convertit approximativement en 4 200 dpi.

Une fois les films numérisés, les fichiers sont chargés dans Matlab et l'espace colorimétrique est converti en LogC4 selon le pipeline ADX10 d'ACES.

2.4 Données d'évaluation

Les données d'évaluation ont été acquises pour comparer les pellicules Kodak Vision 3 avec l'émulation de texture et de couleur appliquée aux images d'Alexa 35. Pour bien analyser les comportements de l'émulation, nous avons acquis des données variées allant de portraits de personnes aux tons de peau variés, de scènes en couleurs avec des objets synthétiques et naturels ainsi que des images extérieures.

3 - Restitution des couleurs

3 . 1 Gestion des couleurs des films ACES

Introduit dans la section 1.5, le système d'encodage de film ACES est basé sur l'ADX10. L'ADX10 est un espace de codage rigoureusement défini dépendant directement des caractéristiques de l'APD³³. Le pipeline de traitement des couleurs introduit par ACES pour convertir l'ADX10 en ACES AP0 est présenté dans un CTL accessible au public sur leur Github³⁴. Le pipeline est construit autour de différentes étapes de traitement composées de transformation matricielle et de linéarisation par une LUT présentées dans la figure 17

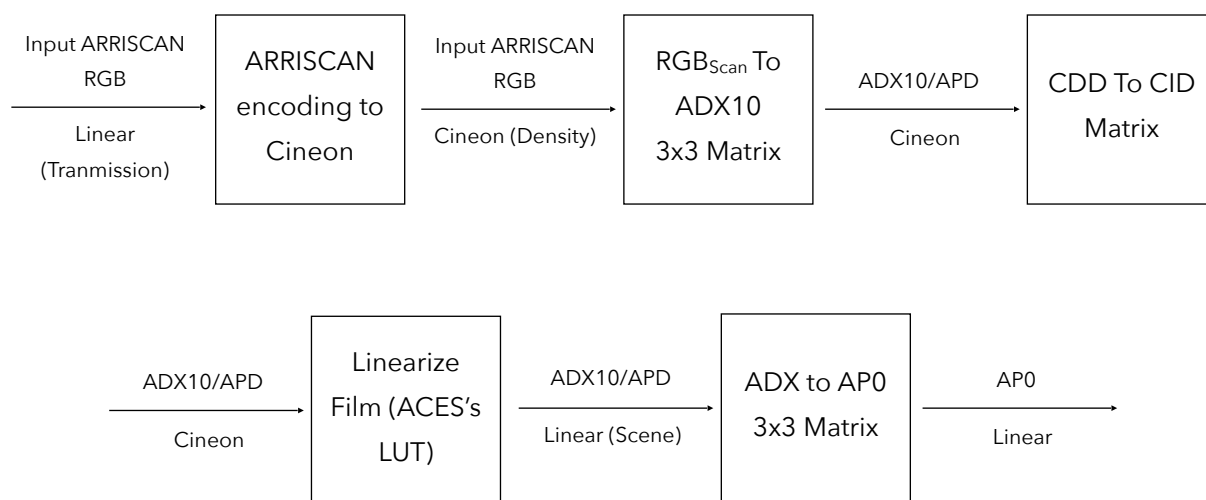


Figure 17 - Pipeline ACES - ADX10ToAP0

Ce pipeline de traitement des couleurs ACES réduit la non-linéarité observable dans le film et améliore notre optimisation pour calculer une transformation matricielle

³³ SMPTE, SMPTE ST 2065-3:2020, *Academy Density Exchange Encoding (ADX) Encoding Academy Printing Density (APD) Values*

³⁴ ACES's ADXToAP0 CTL file on [GitHub](#)

entre Alexa35 et Film section 3.3. De plus, comme nous avons mesuré une courbe caractéristique plus spécifique pour chacun de nos films, nous pouvons effectuer l'étape de linéarisation avec notre propre LUT au lieu de celle générique fournie par ACES.

Pour terminer la transformation de l'espace colorimétrique en LogC4/AWG4, nous poursuivons la transformation de l'espace colorimétrique selon ce pipeline de traitement :



Figure 18 - Color processing- AP0ToLogC4

Toutes les analyses sont effectuées dans le domaine AWG4/LogC4 car nous devons évaluer les caractéristiques du grain, du RoD et de l'halation dans le domaine de synthèse. Par conséquent, les numérisations sont traitées via le pipeline de couleurs qui vient d'être présenté.

Cependant, même si nous avons adapté le pipeline de traitement avec une LUT de linéarisation basée sur les données, la transformation matricielle de l'espace colorimétrique entre ADX10 et AP0 reste générique. Pour obtenir une correction plus précise, nous pouvons acquérir un Color Checker SG à différentes expositions avec les deux supports (argentique et numérique) et calculer une matrice de correction des couleurs 3x3. Ce processus sera détaillé plus en détail dans les sections suivantes.

3.2 Extraction de données

Pour piloter notre algorithme d'optimisation de la correction des couleurs entre l'Alexa35 et le film, nous devons extraire des patches qui ont été exposés au même niveau de lumière. Pour prendre en compte les non-linéarités restantes (concernant l'exposition) du film même après la correction matricielle CDD To CID, nous avons décidé d'optimiser notre matrice pour plusieurs expositions. La correction sera optimisée sur une plage bracketée de 6 valeurs ($\pm 3EV$ autour du gris 18% par pallier de 1EV).

Les images Alexa 35 ont été acquises avec un objectif de cinéma gradué en Tstops tandis que les données du film ont été capturées avec un objectif photographique gradué en Fstops. Par conséquent, la transmission de l'optique n'est pas prise en compte par l'objectif photographique, ce qui entraîne des erreurs dans la correspondance des images. Nous devons trouver l'exposition la plus proche entre le film et le numérique avec une simple analyse de gris à 18 %. Une fois cela fait, la Color Checker SG peut être extrait patch par patch pour chaque exposition numérique et film.

3.3 Correction des couleurs

L'équation que nous essayons de résoudre pour faire correspondre notre caméra numérique (Alexa35) à notre film peut être présentée comme suit :

$$B = M_{CC} \times A \quad \text{Équation 3.1}$$

$$\text{Avec } A = RGB_{Digital} \text{ \& } B = RGB_{Film}$$

$$\text{Et } M_{CC} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \text{ pour une correction des couleurs avec une matrice } 3 \times 3.$$

Pour trouver la M_{CC} matrice inconnue, nous utiliserons l'inverse de Moore-Penrose³⁵ défini comme

$$M_{CC} = BA^T(AA^T)^{-1} \quad \text{Équation 3.2}$$

Pour améliorer la correspondance apportée par la matrice de correction des couleurs, nous pouvons baser notre correction sur une matrice de correction des couleurs 3x6 ou 3x12 basée sur la correction des couleurs polynomiales en racines (Root Polynomial Color Correction - RPCC)³⁶. L'expansion dimensionnelle introduite par ce type de correction affecte non seulement les valeurs RVB, mais aussi des degrés

³⁵ R. C. Aster, B. Borchers, *Parameter Estimation and Inverse Problems*

³⁶ Finlayson, *Color Correction Using Root-Polynomial Regression*
Étude de la texture du film

plus élevés de combinaison de couleurs tels que \sqrt{RG} \sqrt{GB} \sqrt{BR} pour le degré 2. Voici une liste des 3 premiers degrés d'expansion du polynôme racine.

$$P_{1,3} = (R, G, B)$$

$$P_{2,3} = (R, G, B, \sqrt{RG}, \sqrt{GB}, \sqrt{BR})$$

$$P_{3,3} = (R, G, B, \sqrt{RG}, \sqrt{GB}, \sqrt{BR}, \sqrt[3]{R^2G}, \sqrt[3]{R^2B}, \sqrt[3]{G^2B}, \sqrt[3]{G^2R}, \sqrt[3]{B^2R}, \sqrt[3]{B^2G}, \sqrt[3]{RGB})$$

Cette expansion donne plus de liberté à la correction des couleurs, permettant des non-linéarités dans la correspondance des points.

Bien que le RPCC de degré supérieur améliore les résultats sur les points situés entre les points de données d'entrée, il n'affiche pas de bons résultats sur les points hors de l'ensemble de données d'entrée. Pour couvrir ces cas, nous aurions besoin d'un ensemble de données couvrant tout le gamut de notre film et de notre caméra numérique, ce qui est de loin le cas avec le Color Checker SG. Obtenir le spectrum locus de nos deux systèmes réduirait probablement ces problèmes et empêchera les dépassements dans la correction des couleurs saturées. L'exploration de gamut mapping serait également à envisager.

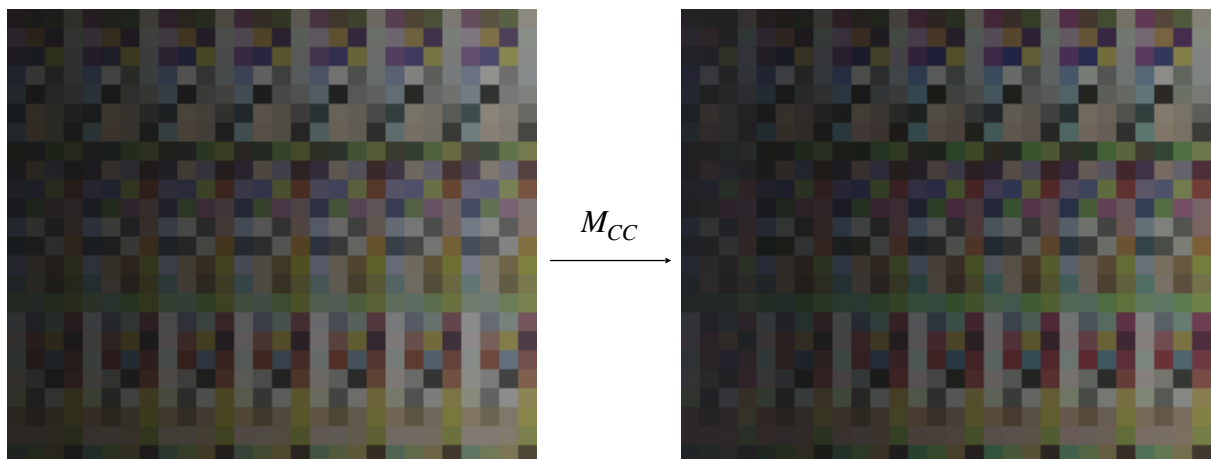


Figure 19 - Couleurs Alexa 35 vers Couleurs 500T

Compte tenu du manque de couleurs hautement saturées dans notre ensemble de données de couleurs capturées par nos caméras et du nombre et de la diversité relativement faibles des patches, nous obtenons des résultats mitigés et des écarts

élevés pour les couleurs saturées (hors ensemble de données d'optimisation). Pour limiter les erreurs dans notre analyse de texture de film, cette matrice remplacera l'ACES AP0 vers ADX10 uniquement après la synthèse de la texture lors de la conversion de LogC4 en StatusM.

NB : En effet, inverser le pipeline ADXToLogC4 est atteignable, car toutes les étapes de traitement sont des matrices. On peut donc faire LogC4ToADX et même StatusM pour appliquer une LUT Kodak2383 PFE (Print Film Emulation).

4 - Mesurer la texture du film

4.1 Rendu des détails

4.1.1 Méthode du bord incliné

4.1.1.1 Dépendance au bruit

La méthode du bord incliné (slanted edge) dépend de la réponse à une fonction échelon (Heaviside) d'un système optoélectronique donné. Le principe d'une telle méthode repose sur la décomposition de Fourier du signal donnant ainsi sa décomposition fréquentielle. Le bord incliné capturé est moyenné selon le bord théorique défini. L'ESF est dérivé et transformé dans le domaine de Fourier pour obtenir la réponse en fréquence du signal capturé (se référer au Contexte). La moyenne (binning) le long du bord nous permet de réduire le bruit contenu dans l'ESF, nous permettant ainsi d'obtenir une mesure plus moins bruitée de la MTF. Pourtant, même avec une moyenne d'environ 4000 lignes (les deux côtés de notre fente inclinée), le bruit reste important dans l'ESF. En conséquence, les MTF sortantes sont moins précises et diminuent légèrement la précision de notre futur algorithme d'optimisation de récupération du kernel (détaillé dans la section 4.1.2).

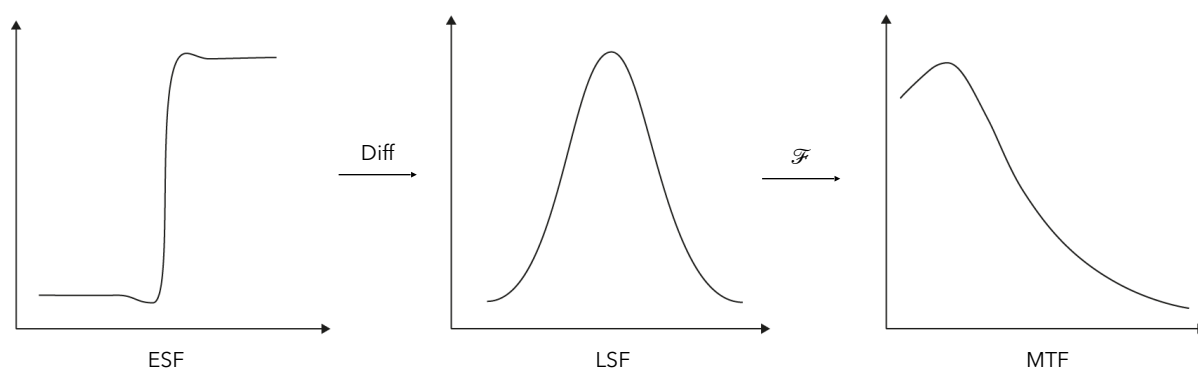


Figure 20 - rappel du principe de MTF

Assez lié à la question bruit/grain, il faut mentionner que la méthode slanted edge a été principalement développée pour éviter un alignement parfait entre le bord et la structure organisée d'un capteur. L'inclinaison de 10° évite une correspondance parfaite avec un décalage mineur par rapport à une MTF de vérité terrain³⁷. Pourtant, si la méthode fonctionne très bien avec un capteur structuré, elle présente quelques inconvénients mineurs pour les dispositifs d'acquisition stochastiques comme le film. Comme on peut le voir sur la figure 21, l'image d'un bord net par une émulsion de film présente une agitation inhérente. Pour l'expliquer, nous pouvons jeter un œil à la structure des halogénures d'argent qui joue un rôle dans le rendu des détails d'une émulsion de film donnée. Néanmoins, les particules fondamentales (halogénures d'argent) ayant une taille comprise entre 0,2 et 2 microns³⁸, le tremblement ne peut atteindre qu'une valeur de 4 microns, indépendamment de la taille des « grains » mesurée.

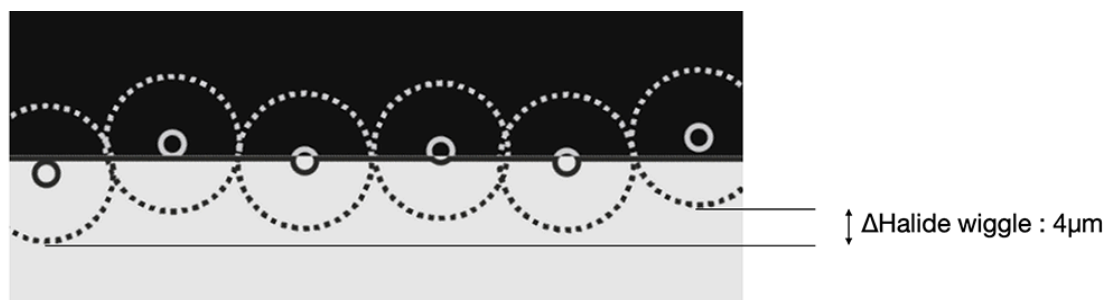


Figure 21 - Position stochastique des halogénures ou mouvement des halogénures

Cela conduit à un effet mineur par rapport à d'autres paramètres affectant le rendu des détails tels que la diffusion Mie et l'effet de bord (acutance). L'agitation sera alors considérée comme ayant trop peu d'impact pour être corrigée.

4.1.1.2 Région d'intérêt

³⁷ Roland, Jackson K. M., *A Study of Slanted-Edge MTF Stability and Repeatability*

³⁸ Tim Vitale, *Film Grain, Resolution and Fundamental Film Particles*, p.2
Étude de la texture du film

La taille et le contenu de la région d'intérêt (region of interest ou ROI) sélectionnée autour de notre bord sont très importants. Pour commencer, une région d'intérêt trop grande pourrait conduire à des inexactitudes sur le calcul de la MTF car le bruit résiduel (après binning) modifierait artificiellement certaines fréquences du spectre. Cependant, une région trop petite et vous n'obtiendrez pas non plus une représentation précise de la MTF, laissant les effets de bord et les effets de diffusion non mesurés et réduisant par la même occasion la résolution de votre MTF. En tenant compte de la taille attendue, de l'effet de flou et de netteté (acutance) que vous pourriez obtenir, vous pouvez adapter la taille de votre région d'intérêt.

4.1.2 Optimisation

Pour extraire des kernel des mesures MTF, nous avons opté pour un algorithme basé sur l'optimisation des moindres carrés (ou distance euclidienne). Comme présenté dans la section Contexte, la MTF se définit comme le module (la valeur absolue) de la transformée de Fourier de la dérivation de l'ESF. Puisque c'est le module qui est considéré dans la mesure de MTF, il n'est pas possible d'appliquer la transformée de Fourier inverse pour en extraire directement un kernel. De plus, les mesures MTF étant bruitées même après binning, l'optimisation des moindres carrés évite d'avoir des kernel mal formés et pleins d'artefacts.

Pour rappel, le rendu des détails du film a été modélisé comme une concaténation de 2 effets physico-chimiques que sont la diffusion de la lumière et l'acutance. Cela n'a pas été clairement indiqué, mais on considère que la diffusion se produit dans le domaine linéaire et l'acutance dans le domaine logarithmique.

Le pipeline de traitement considéré se présente comme tel :

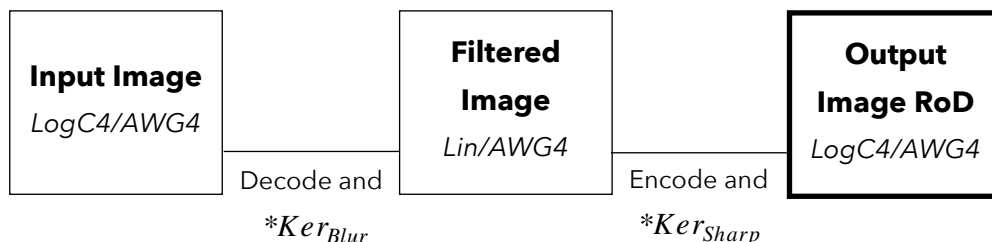


Figure 22 - pipeline pour RoD

Avec les kernels Blur et Sharp définis comme tels :

$$Ker_{1D}(\sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

défini comme un kernel 1D de distribution normale

δ défini comme un kernel Dirac (ou kernel identité), et D le niveau de détail

$$Ker_{Blur}(\sigma) = Ker_{1D}(\sigma) * Ker_{1D}(\sigma)^T \quad \text{Équation 4.1}$$

$$Ker_{Sharp}(\sigma) = \delta + (\delta - Ker_{1D}(\sigma) * Ker_{1D}(\sigma)^T) \times D \quad \text{Équation 4.2}$$

Comme les 2 kernels de filtrage ne fonctionnent pas dans le même domaine nous allons lancer notre optimisation en filtrant un bord synthétique et en calculant sa MTF. Si le filtrage n'avait eu lieu que dans un seul domaine, optimiser nos kernels uniquement en fonction de leur réponse en fréquence aurait pu être une meilleure solution. L'optimisation se déroule ainsi :

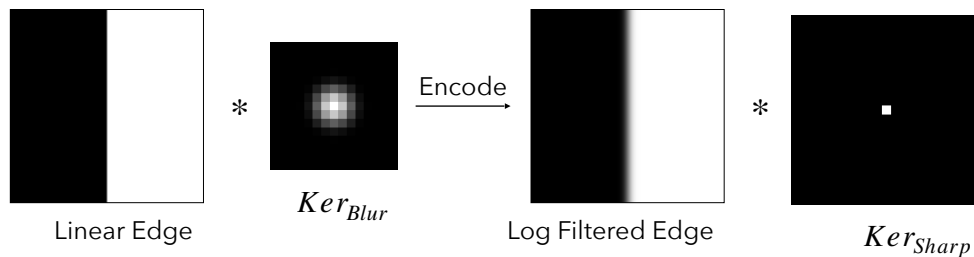


Figure 23 - Traitement et calcul de MTF pour le RoD

Selon un processus qui sera expliqué dans la section 5.2 , Halation est ajouté à notre bord synthétique qui a été filtré deux fois (par Ker_{Blur} et Ker_{Sharp})

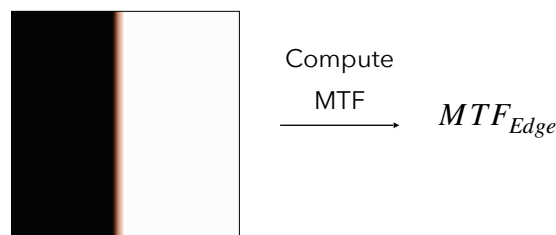


Figure 23 -Traitement et calcul de MTF pour le RoD

Maintenant que nous avons calculé la MTF de notre bord synthétique, nous la convoluons avec la MTF de notre caméra numérique qui dans notre cas a été considérée comme la MTF de l'OLPF (filtre passe bas).

La fonction de coût de l'algorithme d'optimisation est décrite comme :

$$dist = \sqrt{\left(MTF_{Film} - \left(MTF_{Edge} \times MTF_{Alexa35} \right) \right)^2} \quad \text{Équation 4.3}$$

$$\text{Avec } MTF_{Film} = \frac{MTF_{SlitFilm}}{MTF_{LensFilm}} \ \& \ MTF_{Alexa35} = \frac{MTF_{SlitA35}}{MTF_{LensA35}}$$

NB : Dans notre cas, $MTF_{SlitA35}$ notre image de référence n'était pas optimale (manque de netteté dans le canal Bleu) et avons donc décidé de l'utiliser $MTF_{A35OLPF}$ à la place.

De plus, la MTF des deux objectifs MTF_{Lens} , celle utilisée sur l'Alexa35 et sur la caméra argentique, a été mesurée avec la machine MTF d'ARRI avec l'aide de Dimitri Kloster du département optique.

Nous effectuons cette optimisation sur des expositions allant de 0EV à +5 EV (les expositions inférieures et supérieures sont soit trop bruitées, soit pas assez linéaires). Cela nous donne 6 valeurs pour σ_{Blur} , σ_{Sharp} et D. Nous faisons la moyenne de ces 6 valeurs pour récupérer des paramètres uniques.

4.1.3 Résultats préliminaires

Dans cette section, nous présenterons les résultats préliminaires de l'optimisation effectuée pour faire correspondre le rendu des détails de l'Alexa 35 à celui du film (dans cette section, le 500T sera notre cible). Comme expliqué dans la section 4.1.2, nous avons modélisé le rendu des détails du film comme un traitement en 2 étapes composé de 3 paramètres par canal (BlurSize, SharpeningSize, DetailAmount). L'algorithme a été exécuté sur plusieurs expositions et voici quelques nuages de points résumant les résultats pour chaque niveau d'exposition.

Film négatif couleur

Après avoir minimisé les distances MTF basées sur une distance euclidienne, nous obtenons les paramètres du kernel pour chaque exposition. La figure 24 présente les résultats calculés pour faire correspondre à Alexa 35 et Film.

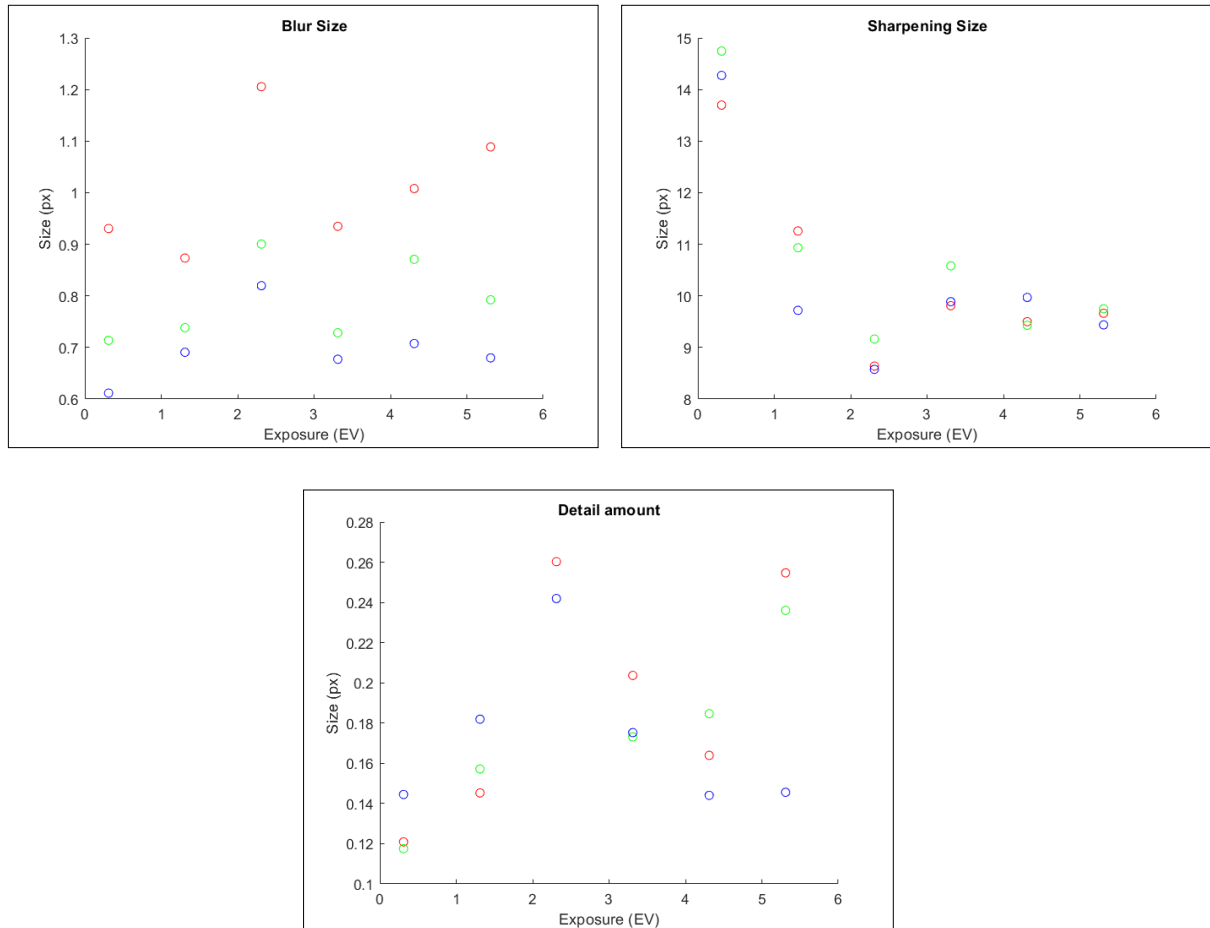


Figure 24 - Paramètres RoD issus de la fonction d'optimisation -
Entrée : Alexa35, sortie : 500T

Même si les résultats présentent clairement un écart type non négligeable, on remarque une certaine constance et nous calculons des moyennes pour chaque paramètre et chaque canal de couleur. Nous nous retrouvons avec un ensemble de 9 paramètres.

Après avoir fait la moyenne de toute l'exposition (0:6), nous récupérons 9 paramètres, 3 par canal.

	R	G	B
σ_{Blur}	1	0,8	0,7
σ_{Sharp}	10,4	10,8	10,3
D	0,19	0,18	0,17

Figure 25 - Paramètres moyens issus de l'optimisation RoD
Entrée : Alexa35, sortie : 500T

4.2 Halation

L'halation était la caractéristique du film la plus difficile à obtenir car il n'existe aucune documentation ou article scientifique à ce sujet. L'halation était considéré comme un effet indésirable et a été amoindri grâce à des couches antihalation situées sous les couches sensibles ou à l'arrière de la base film. Comme expliqué dans la section Contexte, le film est en partie responsable de ces effets visuels mais est également responsable de la possibilité d'enregistrer les caractéristiques optiques apportées par l'objectif lui-même.

4.2.1 Hypothèse théorique

Comme expliqué dans la section Contexte, l'halation est multifactorielle et matérialise de nombreux phénomènes optiques liés à l'objectif utilisé ainsi qu'au film lui-même. On notera ici que les effets introduits par l'objectif ne sont en aucun cas visibles dans une image capturée par un capteur numérique et sont rendus possibles - tout comme les effets apportés par le film lui-même - par l'aspect physique d'un film (en l'occurrence son épaisseur).

Vous trouverez ci-dessous la liste des caractéristiques optiques potentielles liées à l'objectif de prise de vue qui peuvent avoir un impact sur l'halation.

Cette section n'est pas motivée par des citations ou des formules car il s'agit plutôt d'un exercice de réflexion. Aucun résultat de cette section ne sera utilisé dans le processus d'émulation.

L'ouverture

Dans le plan focal image, les points images ne sont considérés comme tel que parce qu'ils se trouvent être inférieurs au cercle de confusion du support de captation utilisé. Cette définition de point n'est valable que dans une zone limitée définie comme profondeur de champ. On sait alors que le point n'existe que s'il se trouve à un endroit précis, c'étant qu'un cône convergent avant le plan focale image et un cône divergent après celui-ci.

Pour simplifier notre modèle, nous ne considérerons que les points nets de notre image qui possèdent alors un cône divergent après notre émulsion. L'ouverture impact la quantité de lumière passant par l'optique, mais également la profondeur de champ en changeant le cône image d'un point donné. Plus le cône est petit, plus la profondeur de champ est importante.

Nous pouvons noter que cet impact de l'ouverture est visible en argentique grâce à sa nature matérielle puisque l'épaisseur du support permet alors de projeter ce cône image sur la couche de remjet.

Pour simplifier considérablement la complexité des objectifs multi-éléments et parce que nous essayons uniquement de trouver des preuves de l'impact des objectifs sur la netteté sur le film en particulier, nous ne considérons qu'un objectif à un seul élément. Ainsi, nous prenons une formule simplifiée pour la surface des rayons sortant de l'élément arrière de la lentille.

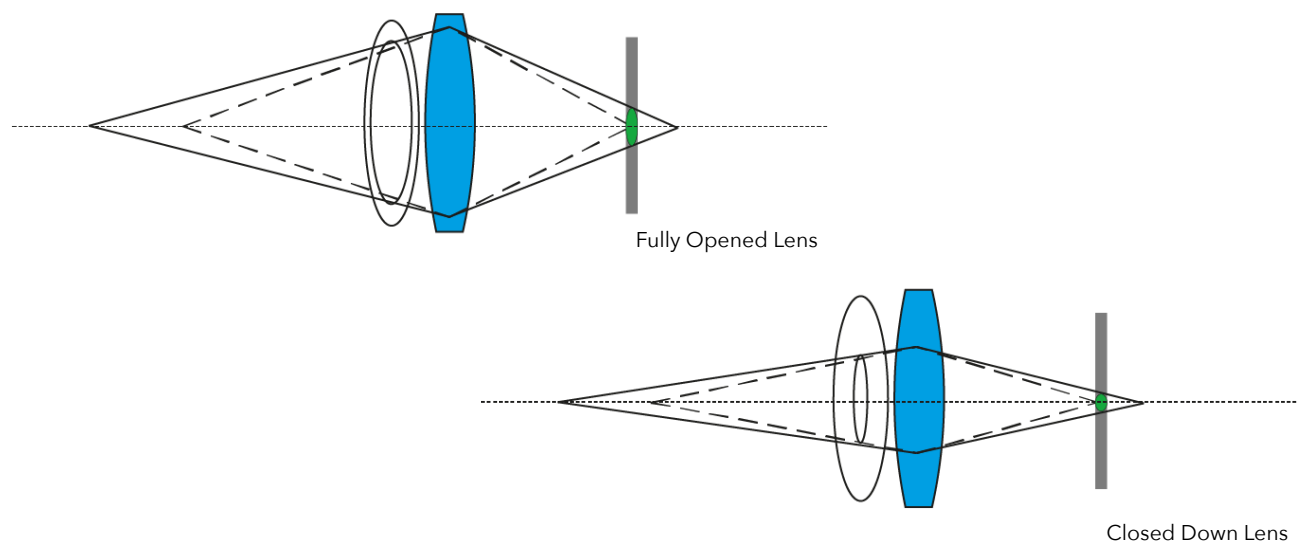


Figure 26 - Schéma de profondeur de champ

Vignettage

Le vignettage ne semble pas être, au premier abord, une caractéristique liée à la structure de l'image, mais seulement à son éclairement. Cependant, en s'interrogeant sur l'origine de vignettage, on remarque que la réduction d'éclairement s'explique par les lucarnes d'entrées et de sorties de notre optique. Les lucarnes remplissent alors un rôle identique au diaphragme de notre objectif : contrôler la quantité de lumière

traversant l'optique ainsi que la profondeur de champ autour point considéré. On en déduit alors que, en fonction du niveau de vignettage de notre objectif, les points situés aux angles de notre image n'auront pas la même profondeur de champ que ceux situés en son centre. On peut même affirmer que plus le vignettage est fort, plus les angles de notre image ont une grande profondeur de champ. Bien que peu visible sur la couche image (si la netteté est réalisée avec soin), on note que la projection de l'image sur la couche de remjet est une fois encore différente en fonction de la position dans l'image considérée. Les points proches de l'axe optique sont plus flous que les points loin de celui-ci.

NB : On notera que cela semble être contrintuitif de conclure que les angles de notre image possèdent une plus grande profondeur de champ que son centre et que par conséquent les angles ont la capacité d'être plus nets. Cependant, la baisse de performance régulièrement observée dans les angles d'une image ne sont pas dus à la profondeur de champ, mais aux diverses aberrations présentes dans une optique comme des aberrations sphériques, de l'astigmatisme, de la coma ou de la courbure de champ.

On notera également que pour la modélisation du vignettage présentée ci-dessus, on considère la courbure de champ de l'objectif comme inexistante et que le front d'onde arrivant sur notre film est parfaitement parallèle à celui-ci. On considère alors le vignettage comme n'étant qu'un phénomène imputable aux lucarnes d'entrée et de sortie.

Chief Ray Angle (CRA) Angle d'incidence

Les rayons principaux d'une optique sont les rayons passant par le centre du diaphragme. À l'usage cependant, on considère le rayon principal comme étant LE rayon passant par le centre du diaphragme et étant à la limite du cercle de couverture (considéré comme l'un des angles de notre image).

On note que l'angle des rayons principaux avec l'axe optique augmente linéairement avec la distance du point considéré du centre optique (pour une optique sphérique aplanétique).

Bien que les CRA ne soient pas sans impact (problème de captation par les photosites périphériques recevant des rayons avec un angle trop important) sur les

capteurs numériques et leurs problèmes principalement adressés par l'ajout de microlentilles, ils se matérialisent de façon bien différente sur un support photographique argentique. En effet, l'émulsion (surface sensible) du film quant à elle n'est pas impacté par les CRA périphériques. Cependant, en raison de la nature physique du film photographique (son épaisseur), l'image initialement formée au niveau de l'émulsion s'est alors projetée plus loin sur la dorsale du film (au niveau de la couche de remjet). Entre-temps, les rayons ont subi d'autres altérations optiques qui seront développées ci-dessous. On observe alors un phénomène de déplacement centrifuge : les points de l'image étant le plus impactés le sont proportionnellement à leur éloignement du centre optique.

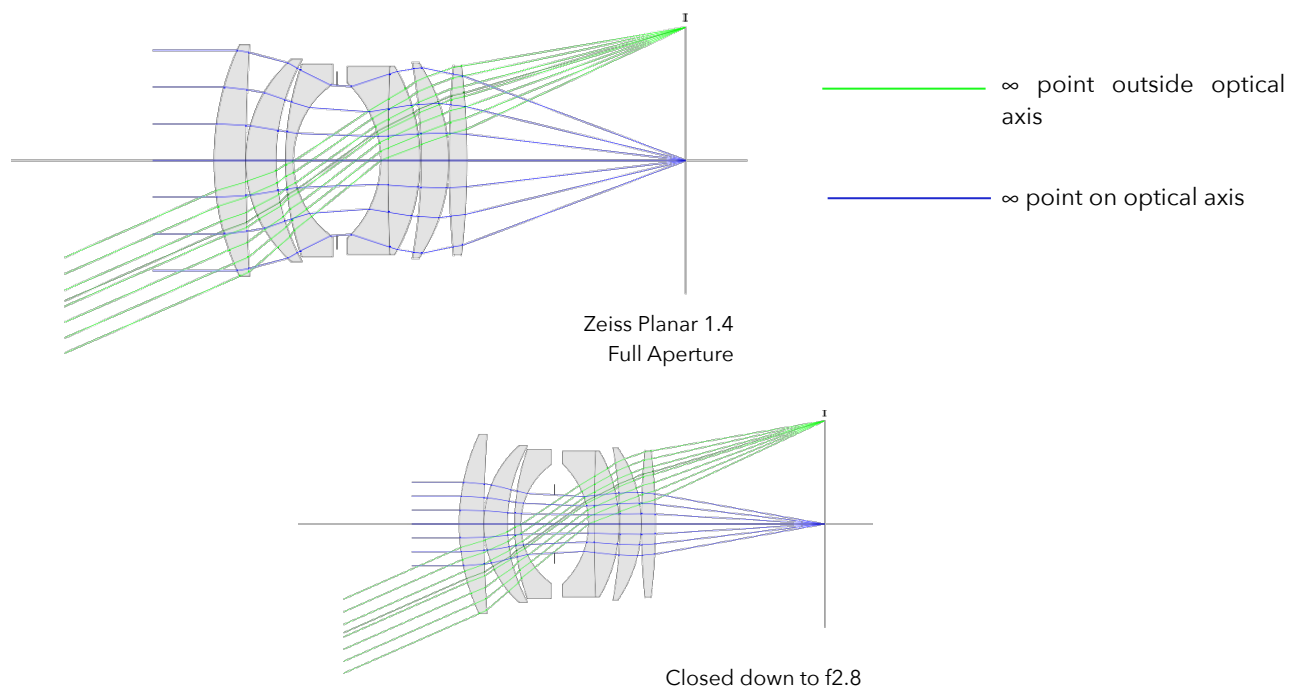
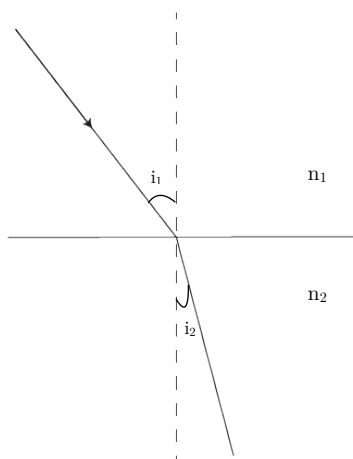


Figure 27 - Photons to photos : schéma CRA

Réfraction

L'indice de réfraction de la gélatine photographique et du support film lui-même possèdent un indice de réfraction avoisinant 1,5. Cette propriété optique du film photographique vient alors réduire un phénomène évoqué auparavant. En effet, l'angle d'arrivée des rayons provenant de l'élément arrière de notre objectif se trouve alors amoindri. En appliquant les lois de Snell-Descartes, l'image projetée sur la couche de remjet est moins déformée.



$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$$

Figure 28 - Loi de Snell-Descartes

Diffusion et filtrage

Les multiples couches de gélatine chargées en halogénures d'argent couchées sur notre base film diffusent fortement la lumière traversant notre film. Les couches sensibles de notre film étant composée de plusieurs millions de cristaux d'argent, la lumière est diffusée alors qu'elle s'enfonce dans le support. On considère, compte tenu de la taille des cristaux considérés (d'environ un micron) et de leurs caractéristiques optiques, que leur diffusion est proche d'une diffusion de Mie. Nous aurions pu alors traduire cette diffusion par une loi normale d'écart type corrélé à l'épaisseur du film, à la surface et au volume des halogénures. Cependant, au vu de la complexité de la modélisation de la diffusion de Mie et aux résultats incertains de cette dernière, nous avons décidé de modéliser le phénomène en doublant la taille de la loi normale modélisant la divergence des rayons après le plan focale image.

Cette étape de la modélisation nécessiterait une recherche bibliographique et documentation scientifique plus important. Ce point sera sûrement abordé avec plus de détail dans la version définitive de mon travail (le mémoire).

Nous pouvons noter que les MTF données dans les datasheets de pellicules argentiques peuvent être utilisées pour obtenir la diffusion obtenue sur la base film.

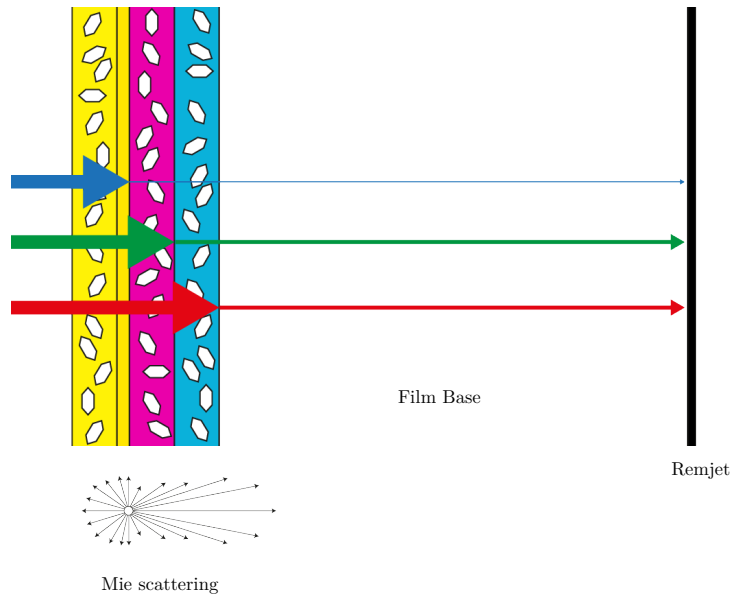


Figure 29 - Film découpé avec couches et remjet, diffusion de Mie.

En conclusion, toutes ces observations peuvent être résumées en une seule formule pour calculer le diamètre du disque flou au centre du cadre (sans tenir compte du vignettage). Cette formule n'est pas précise en raison des simplifications apportées par la considération d'un système à élément unique au lieu d'un objectif à plusieurs éléments. Le diamètre de sortie est considéré comme étant le même que celui des lamelles d'ouverture (étant également le même que la pupille d'entrée).

$$Angle_{Top/Bottom} = \arcsin \left(\frac{\sin \left(\pm \frac{1}{2} \tan \left(\frac{1}{2 \times A} \right) \right)}{i_{film}} \right) \quad \text{Équation 4.4}$$

$$d_{Blur} = \pm 2B \times \arctan \left(Angle_{Top/Bottom} \right) \times r_{film}$$

Où B : Épaisseur de la base du film (m), A : Ouverture de l'objectif (ouverture numérique), i_{film} : Indice de réfraction du film (1,5)

4.2.2 Domaine et comportement d'exposition

En raison de la façon dont nous pensons que l'halation se manifeste dans le film, nous avons émis l'hypothèse dès le début que l'effet devrait être additif dans le domaine linéaire. Il semble, après toutes nos expériences, que cela soit effectivement exact.

Nous avons étudié la région située à 5 pixels de la position du bord (point unique défini comme le point où le gradient (la dérivée première) est le plus élevé, positionné à $N/2$ étant la moitié de la largeur de notre ESF) pour obtenir l'effet d'halation tout en évitant le flou dû à la diffusion de l'émulsion (d'une largeur d'environ 2 pixels). Pourtant, nous n'étions pas hors de la zone d'acutance, qui mesure environ 20 pixels de large. Malheureusement, des choix ont dû être faits et ce chevauchement spatial de ces deux effets n'a pas pu être évité.

Nous avons remarqué que le rapport entre la partie éclairée de la fente et le pixel d'intérêt sélectionné était constant dans le domaine linéaire, confirmant ainsi la linéarité de l'effet dans le domaine linéaire.

$$\text{En prenant } p = 5 : Hal_{Ratio}(E, c, p) = \frac{ESF\left(\frac{N}{2} - p, E, c\right)}{Slit(E, c)} \quad \text{Équation 4.5}$$

avec $E \in [-6, 11]$ l'exposition et $c \in [R, G, B]$

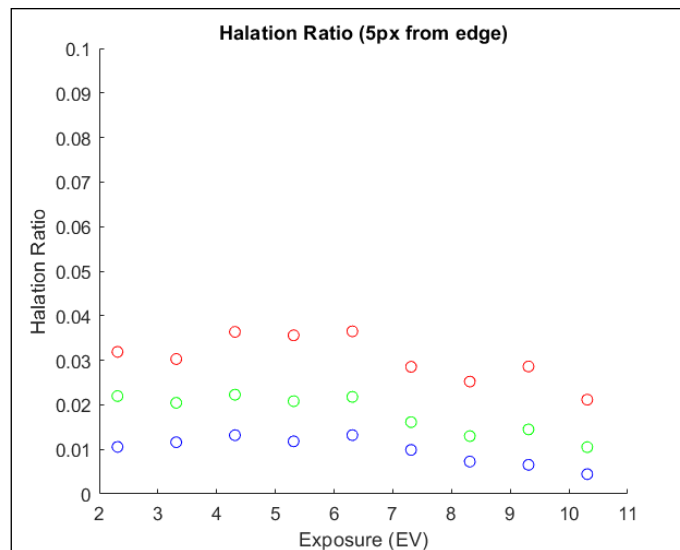


Figure 31 - Halation Ratio (5px)

Dans la suite de la section 4.2, nous considérerons que la moyenne de Hal_{Ratio} sur les expositions +5 à +11 sera appelé Hal_{Ratio} (car constante peu importe l'exposition).

$$Hal_{Ratio}(c, p) = \frac{\sum_{E=5}^{11} Hal_{Ratio}(E, c, p)}{7} \quad \text{Équation 4.6}$$

4.2.3 MTF et taille

Mesurer correctement la taille de l'halation était l'une des questions les plus difficiles auxquelles nous avons dû répondre. Nous pensions que l'halation serait impactante de manière significative dans les mesures MTF pour les expositions les plus élevées. Pourtant, nous avons remarqué que même si les MTF étaient effectivement modifiées par l'halation, la concaténation de différents phénomènes rendait le nombre de paramètres de notre modèle trop élevé et donc trop instable pour être optimisé. Il n'était alors pas considéré comme fiable pour à la fois extraire la taille de nos kernels de RoD et les ceux de l'halation. Néanmoins, en raison de son impact quantifiable sur le MTF, Halation a été pris en compte dans l'algorithme d'optimisation utilisé pour récupérer les paramètres RoD.

Comme expliqué en détail dans la section 4.2.1, des simulations géométriques préalables ont été réalisées pour avoir une compréhension globale de l'effet. Pourtant, certaines hypothèses erronées ou du moins inexacts et non vérifiables ont été formulées et ont été retirées de cette section (voir les hypothèses erronées dans la figure 32 et les explications ci-dessous).

Il nous a semblé logique que la surface de contact entre le remjet et le support du film soit effectivement comparable à un diffuseur Lambertien³⁹ obéissant ainsi à la loi de réflectance en cosinus. Ceci nous amène cependant à la conclusion que cette surface hautement diffusante était effectivement toujours là après le traitement (lorsque la remjet est retirée en ECN2), ce qui n'était pas le cas. En effet, le support du film est assez lisse et l'interface entre le film et le remjet doit plutôt être spéculaire que diffuseuse. De plus, il semble que la manière dont la couche d'anti-

³⁹ Janecek, Martin, et William W. Moses. *Optical Reflectance Measurements for Commonly Used Reflectors*

halation fonctionne consiste à neutraliser les rebonds de lumière indésirables en absorbant autant de lumière que possible avec des composants noir dense et non en la diffusant fortement. De plus, le filtrage spatial de la lumière comme le ferait un diffuseur Lambertien nous a donné des résultats loin de l'effet d'halation que nous obtenons sur un film (voir Annexe 3).

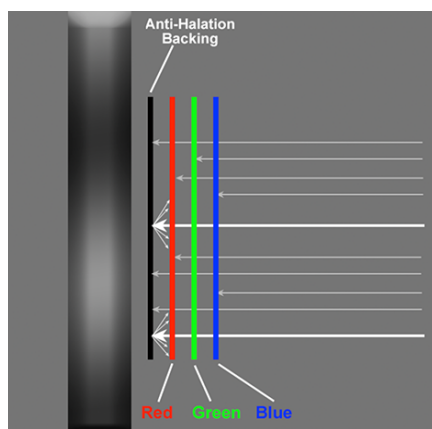


Figure 32 - Tobias Deml,
Halation schematic

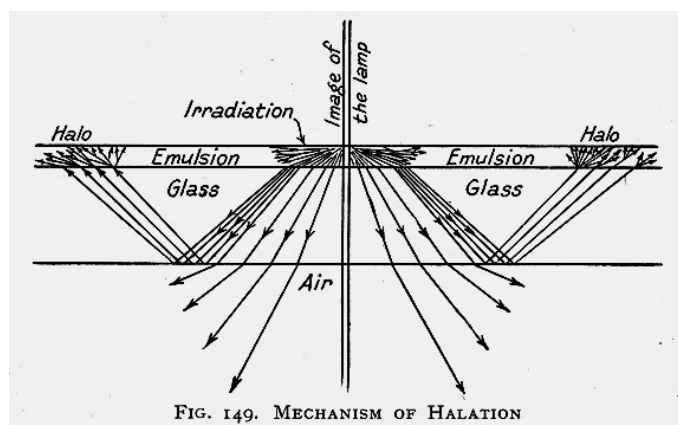


Figure 33 - LP Clerc, Théorie photographique –
La Technique Photographique,
Schéma de l'halation

Nous n'avons pas pris en compte l'impact de l'hypothétique diffusion supplémentaire apportée par l'interface remjet/film-base du film et, comme expliqué ci-dessus, avons calculé la taille de notre halo en fonction de la diffusion des halogénures d'argent dans les couches supérieures.

Nous avons décidé de nous appuyer sur les résultats d'optimisation RoD précédemment calculés et plus particulièrement sur le sigma des kernel flous (KerBlur) des couches RVB. Nous avons extrapolé la diffusion en fonction de l'épaisseur de la base du film (normalisée à 0,135 mm pour tout film argentique). Les mesures des couches du film sont fournies en annexe 4

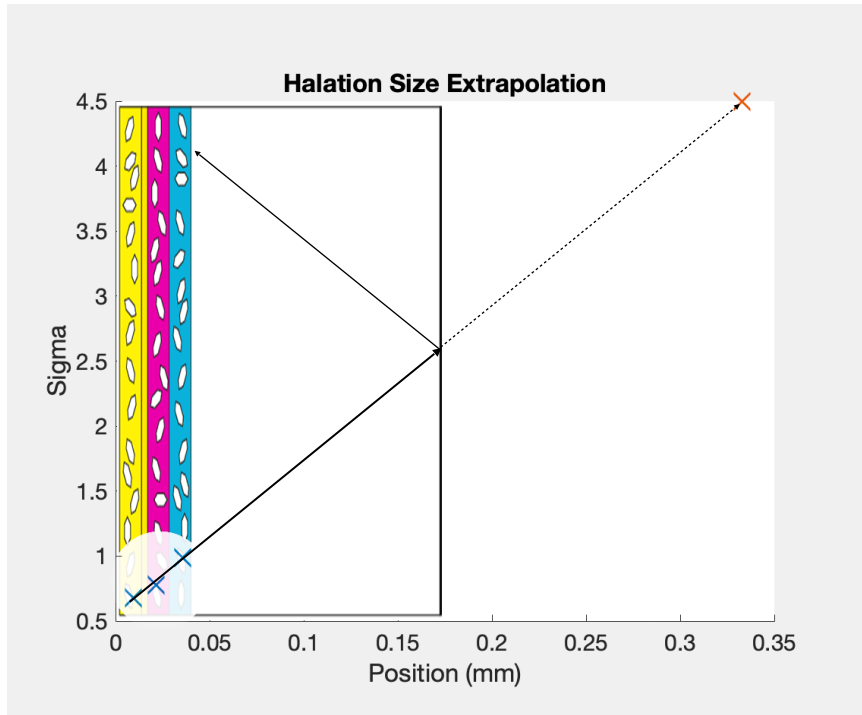


Figure 34 -Extrapolation des sigma des kernels de filtrage

Cela nous donne une idée de la taille du kernel de filtrage de l'halation, mais le processus est un peu instable, car les mesures de flou sont regroupées dans une petite région et que nous souhaitons extrapoler dans une région bien plus éloignée. De plus, il s'appuie sur l'optimisation RoD qui elle-même repose sur la taille du kernel d'halation pour fonctionner correctement. Ce conflit nous a poussé à envisager une autre méthode basée sur la ESF.

Comme nous l'avons expliqué dans la section 4.2.2, nous considérons que le processus de Halation est additif et croissant linéairement dans le domaine linéaire. Nous avons donc décidé d'obtenir un échantillonnage de l'halation de 3 à 10 pixels de notre position de bord. Leurs ratios moyens ont été calculés en les divisant par leur valeur d'exposition de fente (voir l'équation 4.6). Nous avons ensuite pris en compte l'impact du filtrage par halo basé sur un bord synthétique (Edge) de taille N convoluée avec des kernel gaussiens de sigma croissant (σ). Trouver le bon σ est nécessaire pour récupérer le coefficient de Halation car la mesure Hal_{Ratio} ne prend pas en compte le kernel de filtrage Halation. La méthode est expliquée dans l'équation 4.7

Pour $\sigma \in [4,8]$: $Hal_{Coeff}(c, p, \sigma) = \frac{Hal_{Ratio}(c, p)}{[Ker_{Halation}(\sigma) * Edge] \left(c, \frac{N}{2} - p \right)}$ **Équation 4.7**

en $p \in [3,10]$ étant positionné à partir du bord (situé à $\frac{N}{2}$)

À partir de ces coefficients d'halation, nous calculons les écarts types par valeur sigma de filtre Gaussien (équation 4.1). Nous visons l'écart type le plus faible car cela nous assure d'obtenir un comportement linéaire de l'halation, quelle que soit la position par rapport au bord.

Pour $\sigma \in [4,8]$: $\sigma_{Hal_{Coeff}}(c, \sigma) = \sqrt{\frac{1}{8} \times \sum_{p=3}^{10} [Hal_{Coeff}(c, p, \sigma) - \mu_{Hal_{Coeff}}(c, p)]^2}$

Équation 4.8

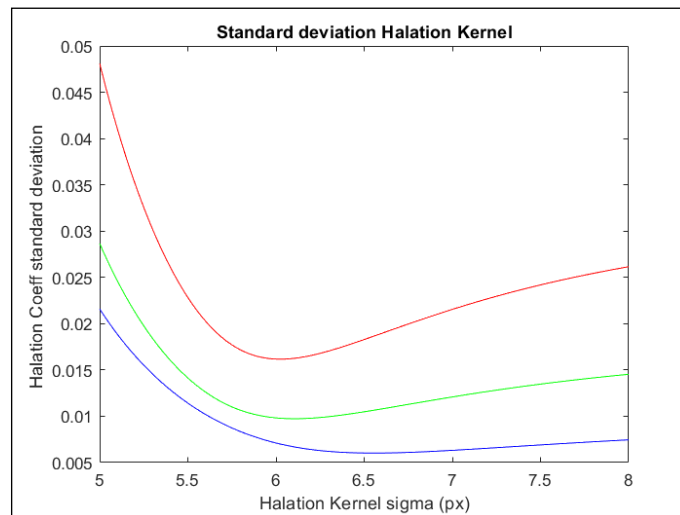


Figure 35 - Kernel d'Halation écart type
Ecart type du Coefficient d'Halation sur la taille du kernel d'Halation

Ces résultats nous donnent l'écart type du kernel de filtrage de l'Halation qui permet des rapports d'halation égaux après correction. Cette méthode sera préférée à l'extrapolation du kernel de flou produit par l'algorithme d'optimisation RoD.

Pour σ produisant $Min[\sigma_{Hal_{Coeff}}(R, \sigma)]$

$$Hal_{Coeff}(c, p, \sigma) = \frac{Hal_{Ratio}(c, p)}{[Ker_{Halation}(\sigma) * Edge] \left(c, \frac{N}{2} - p \right)} \quad \text{Équation 4.9}$$

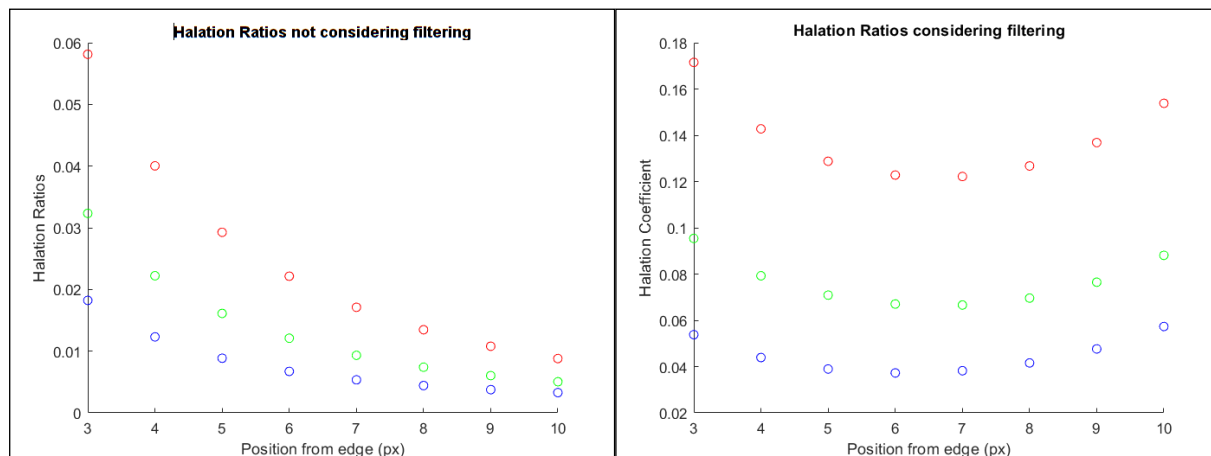


Figure 36 - Rapports de Halation avant et après compensation du filtrage

4.2.4 Couleur

Comme mentionné ci-dessus, pour mesurer correctement la réponse MTF de notre film, nous avons décidé de la linéariser. De plus, nous avons même choisi d'opérer une transformation de l'espace colorimétrique du film ADX10/APD vers LogC4/AWG4 en utilisant le pipeline ACES standard avec une LUT de linéarisation personnalisée pour mieux s'adapter à notre propre ensemble de données. En effet, le domaine dans lequel les caractéristiques spatiales du film sont synthétisées est LogC4/AWG4 réalisé pour l'Alexa35.

L'halation étant identifiable par sa couleur rouge/orange caractéristique, il était important de trouver un moyen de la caractériser et de la reproduire avec précision.

Comme présenté dans la section précédente, nous avons optimisé la taille de notre kernel pour obtenir le plus petit écart type pour les coefficients d'halation allant de 3 à 10 pixels du bord (section 4.2.3). Une fois que nous avons obtenu la bonne taille de kernel, nous pouvons calculer le coefficient d'halation comme la moyenne des coefficients d'halation de la position 3 à 10.

Pour σ produisant $Min[\sigma_{HalCoeff}(R, \sigma)]$

$$Hal_{Coeff}(c, \sigma) = \frac{1}{8} \times \sum_{p=3}^{10} \frac{Hal_{Ratio}(c, p)}{[Ker_{Halation}(\sigma) * Edge] \left(c, \frac{N}{2} - p \right)} \quad \text{Équation 4.10}$$

$$\text{Avec } Hal_{Ratio}(c, p) = \frac{\sum_{E=5}^{11} Hal_{Ratio}(E, c, p)}{7} \text{ (voir l'équation 4.6)}$$

Les coefficients d'halation sont le résultat de valeurs normalisées Hal_{Ratio} corrigées par des effets du filtrage (section 4.2.3). Ils nous donnent le niveau par canal de la couche d'halation avant qu'elle ne soit filtrée.

En conclusion, l'halation est un effet linéaire croissant et additif dans le domaine linéaire. Sa taille, bien qu'extrapolable à partir de la taille du kernel de flou RoD, est calculée à partir des points de l'ESF du film allant de 3 à 10 pixels du bord et d'une optimisation minimisant l'écart type. Il convient de noter ici que la première méthode donnait un sigma de kernel d'halation avec une valeur inférieure de 25 % à celle de la seconde méthode. Les coefficients de couleur sont calculés à partir de ratios corrigés de l'impact du filtrage d'halation.

4.3 - Grain

Comme mentionné précédemment, le grain dépend fortement des caractéristiques du domaine considéré, à la fois en termes de gamut et de courbe d'encodage. Bien que la corrélation spatiale reste assez similaire dans la conversion de l'espace colorimétrique, l'écart type du bruit, ainsi que la corrélation des couches (RVB), sont considérablement modifiés. En conséquence, extraire des caractéristiques de grain film dans l'optique de les synthétiser sur des images numériques doit être effectué dans l'espace colorimétrique approprié (celui de synthèse). La caméra numérique principalement utilisée pour ce mémoire étant l'Alexa35, l'espace colorimétrique choisi était LogC4/AWG4. Le choix de cet espace signifie que nous pouvons synthétiser le grain du film directement sur des séquences LogC4/AWG4 sans aucune conversion d'espace colorimétrique et que vous pouviez l'ajouter après l'étalonnage si cela était effectué dans le domaine approprié.

4.3.1 Puissance

La puissance du bruit est directement associée au sigma du bruit et pourrait même être considérée comme un synonyme. Le grain du film (film négatif N&B et couleur) peut être décrit comme un bruit Gaussien, ce qui signifie qu'il peut être généré avec une simple distribution normale avec un sigma et un mu donnés (respectivement écart type et moyenne). Cependant, cette puissance de bruit n'est pas constante sur toute la plage d'exposition. Comme pour les appareils photo numériques, le bruit est directement lié au niveau du signal pour diverses raisons. De plus, bien qu'ils soient tous deux analogiques, les films négatifs N&B et couleur n'ont pas le même profil de signal bruit, ce qui entraîne une puissance et repartition de bruit différente.

Grâce au protocole expliqué dans la section 2.2, et avec un calcul d'écart type détaillé dans les équations 4.11, nous sommes en mesure d'obtenir la LUT sigma appropriée (Look Up Table avec le signal en entrée et l'écart type (sigma) du bruit en sortie).

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad Var = \sigma^2 \quad \text{Équations 4.11}$$

4.3.2 Corrélation des couleurs

La corrélation des couleurs a été considérée comme non pertinente au début de ce mémoire car nous pensions que chaque couche de film était indépendante les unes des autres. De plus, des tests préliminaires ont été réalisés en noir et blanc pour vérifier le coût et la facilité de développement (les films pouvaient être développés pour le lendemain). De plus, l'effet d'occultation qui pouvait se produire lors de la numérisation d'un film couleur négatif n'avait pas été détecté. En effet, les nuages de colorants provenant de différentes couches pourraient se superposer, ce qui entraînerait une forte corrélation entre les couches.

Les coefficients de corrélation de Pearson⁴⁰ ont été utilisés pour caractériser ces dépendances intercouches. Les coefficients de Pearson sont formulés par l'équation 4.12 et peuvent être définis comme la covariance pondérée par l'écart type de deux variables considérées. Dans notre cas, les couples considérés sont RG, GB et BR.

$$\rho_{X,Y} = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad \text{Équation 4.12}$$

Les coefficients de Pearson sont utiles pour mesurer la corrélation des couches, mais ils ne nous ont pas permis de trouver une formule simple permettant de décomposer un bruit corrélé en une somme de trois bruits non corrélés. En effet, comme expliqué précédemment, nous attribuons l'essentiel de la corrélation apportée lors du scan et provenant de la conception empilée des couches de film. En gardant cette hypothèse en tête, nous avons donc choisi de modéliser notre grain de film comme une somme de bruit décorréolé. Le principe était simple et reposait sur la génération de trois bruits gaussiens blancs non corrélés (que nous appellerons bruit directeur (driving noise)) et sur leur corrélation ultérieure. Le bruit directeur sera calculé selon l'équation 4.13.

⁴⁰Le coefficient de Pearson définit la corrélation linéaire entre 2 jeux de données : Définition
Étude de la texture du film

Équation 4.13

$$\begin{cases} \text{Var}(R_{input}) = \text{Var}(R_d + aG_d + cB_d) = \text{Var}(R_d) + a^2\text{Var}(G_d) + b^2\text{Var}(B_d) \\ \text{Var}(G_{input}) = \text{Var}(aR_d + G_d + cB_d) = a^2\text{Var}(R_d) + \text{Var}(G_d) + c^2\text{Var}(B_d) \\ \text{Var}(B_{input}) = \text{Var}(bR_d + dG_d + B_d) = b^2\text{Var}(R_d) + c^2\text{Var}(G_d) + \text{Var}(B_d) \end{cases}$$

Avec $\text{Var}(RGB_{input})$ la variance du bruit de film mesuré par canal (corrélé) et $\text{Var}(RGB_d)$ la variance du bruit directeur (non corrélé).

Les coefficients a, b et c seront obtenus grâce à un algorithme d'optimisation pour minimiser la distance euclidienne (Équation 4.14) entre les coefficients de Pearson d'entrée et de sortie. Les variances du bruit directeur seront obtenues en résolvant le système tel que présenté en annexe 5.

$$d = \sqrt{(\rho_{R,GInput} - \rho_{R,GOutput})^2 + (\rho_{G,BInput} - \rho_{G,BOutput})^2 + (\rho_{B,RInput} - \rho_{B,ROutput})^2}$$

Équation 4.14

Input étant le bruit ciblé et *Output* le bruit à l'itération en cours de l'optimisation

4.3.3 AutoCorrélation et Densité Spectrale de Bruit

Le grain du film ne peut pas être décrit uniquement par sa puissance et sa corrélation entre les couches. La corrélation spatiale joue un rôle cruciale dans l'apparence du grain film généré. La corrélation spatiale est directement liée à la taille des grains mais prend également en compte la concaténation du dispositif opto-électronique utilisé. Un seul grain est considéré comme une petite région homogène conduisant à un point fortement corrélé avec ses voisins. Pour mesurer cette caractéristique, nous avons besoin d'une grande surface sans texture éclairée de manière homogène pour calculer la corrélation spatiale entre un pixel donné et ses voisins.

La littérature actuelle propose différentes méthodes et théoriquement similaires pour analyser la corrélation spatiale.

L'autocorrélation est basée sur la covariance entre un point donné et ses voisins dans un voisinage donné (détaillé dans l'équation 4.15). Cela vous donne une carte 2D du voisinage considéré avec des chiffres plus élevés lorsque la corrélation est élevée.

Considérons une plaque de grains I de taille N. Afin de calculer l'auto-corrélation de cette plaque de grains, nous devons considérer E défini comme notre plaque de grains dont la moyenne a été soustraite.

$$E(c) = I(c) - \mu_I(c) \quad \text{Avec } c \in [R, G, B]$$

Pour le calcul de μ_I , voir les équations 4.11

L'autocorrélation de cette plaque de grain soustraite moyenne est définie dans l'équation 4.15.

$$\mathcal{A}(x, y, c) = \frac{1}{N^2} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N E(a, b, c) \times E(a + x, b + y, c) \quad \text{Équation 4.15}$$

Avec $[x, y] \in [-7, +7]$, $N = \text{SizeSampledRegion}$, $c \in [R, G, B]$

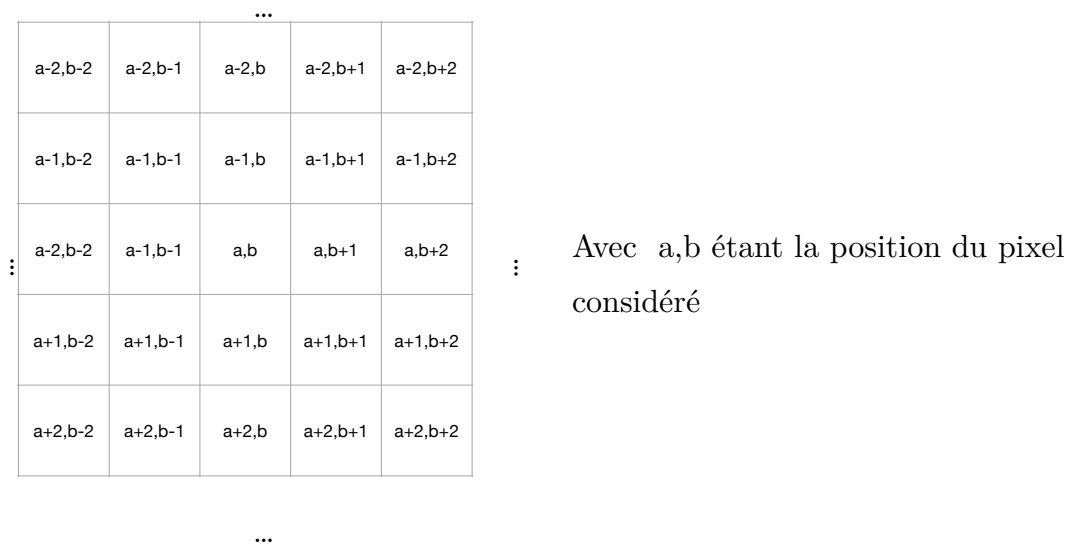


Figure 37 - Voisinage pour le calcul de l'AutoCorrelation

De même, pour obtenir la corrélation spatiale *entre* les couches, la corrélation croisée est définie comme

$$\mathcal{C}(x, y, c_1, c_2) = \frac{1}{N^2} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N E(a, b, c_1) \times E(a + x, b + y, c_2) \quad \text{Équation 4.16}$$

Où $[x, y] \in [-7, +7]$, $N = \text{SizeSampledRegion}$,
 $c_1 \in [R, G, B]$, $c_2 \in [R, G, B] \& c_1 \neq c_2$

L'autocorrélation a été étudiée à un stade ultérieur dans l'analyse de la corrélation spatiale du bruit et le NPS était le principal outil mathématique utilisé pour mesurer cette caractéristique du bruit. Pourtant, les résultats n'étaient pas au rendez-vous car nous n'avions pas suffisamment de points d'échantillonnage dans notre méthode de mesure originale. La méthode consistait à prendre la transformée de Fourier de la plaque de grain entière et à faire une moyenne spatiale dans le domaine de Fourier pour réduire l'impact du bruit sur la mesure. Plusieurs méthodes utilisant le sous-échantillonnage dans le domaine spatial et les échantillons superposés ont également été testées pour rechercher et trouver la méthode la plus adaptée à notre mesure mais sans aucune amélioration notable.

$$NPS = \frac{1}{N^2} |\mathcal{F}(E)|^2 \quad \text{Équation 4.17}$$

De plus, le NPS étant la valeur absolue de la transformée de Fourier, nous perdons des informations dans le processus et sommes incapables d'appliquer une transformée de Fourier inverse pour récupérer un kernel de filtrage. Notre première méthode⁴¹ était basée sur une optimisation dans le domaine fréquentiel entre le \sqrt{NPS} et la réponse en fréquence d'un kernel de filtrage (qui est un mélange de kernel de flou et d'accentuation). Les résultats obtenus étaient corrects, mais le processus d'optimisation était fastidieux sans raison valable. Enfin et surtout, le théorème de Wiener-Khinchin donne la relation directe entre l'autocorrélation et le NPS comme le montre l'équation 4.18, ce qui laisse espérer trouver une méthode appropriée pour extraire les grains filtrants directement de nos plaques à grains.

$$\mathcal{A} = \mathcal{F}^{-1}(NPS) \quad NPS = \mathcal{F}(\mathcal{A}) \quad \text{Équations 4.18}$$

⁴¹ S. Eckel, P. Huthwaite, U. Zscherpel, A. Schumm and N. Paul, *Realistic Film Noise Generation Based on Experimental Noise Spectra*

La formule utilisée pour le calcul d'un kernel se base sur l'autocorrélation d'une plaque de grains soustraite de sa moyenne. Pour obtenir un kernel de filtrage utilisable et éliminer les décalages restants dans la matrice d'autocorrélation, les voisins les plus éloignés du point caractérisé sont moyennés et soustraits de la mesure d'autocorrélation. Pour obtenir la réponse en fréquence attendue, la matrice d'autocorrélation est mise au carré pour obtenir le bon kernel de filtrage. Pour une matrice d'AutoCorrélation de taille N, on obtient :

$$Ker_c = \left[\mathcal{A}(c) - \frac{[\mathcal{A}(1,1,c) + \mathcal{A}(1,N,c) + \mathcal{A}(N,1,c) + \mathcal{A}(N,N,c)]}{4} \right]^2 \text{ avec } c \in [R, G, B]$$

Équation 4.19

De la même manière

$$Ker_{c_1c_2} = \left[\mathcal{C}(c_1, c_2) - \frac{[\mathcal{C}(1,1,c_1,c_2) + \mathcal{C}(1,N,c_1,c_2) + \mathcal{C}(N,1,c_1,c_2) + \mathcal{C}(N,N,c_1,c_2)]}{4} \right]^2$$

avec $c_1 \in [R, G, B]$, $c_2 \in [R, G, B] \& c_1 \neq c_2$

Équation 4.20

4.3 .4 Résultats préliminaires

Dans cette section, nous présenterons quelques résultats qui ont été obtenus en exécutant un algorithme gérant la transformation de l'espace colorimétrique ainsi qu'en extrayant les caractéristiques du grain de notre film numérisé et de nos images numériques. Cette section couvrira uniquement les résultats de 500T pour le film et des images de l'Alexa 35 avec un EI de 200.

Film négatif couleur

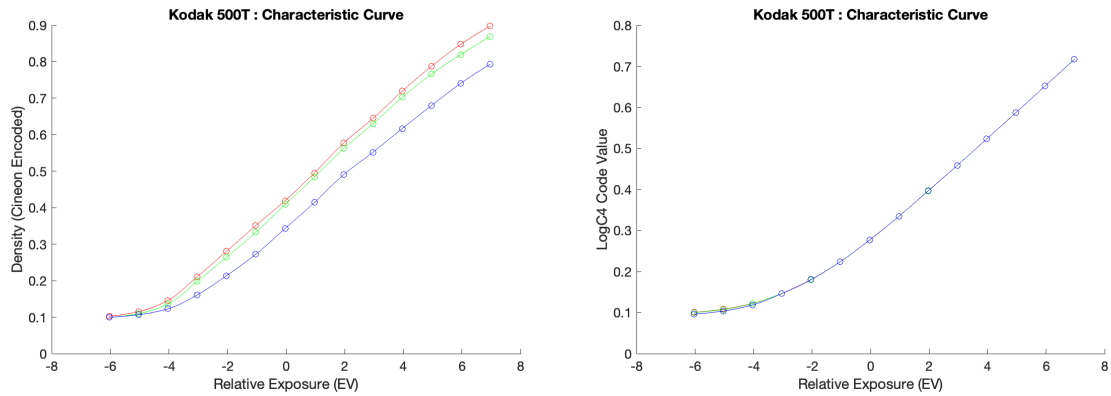


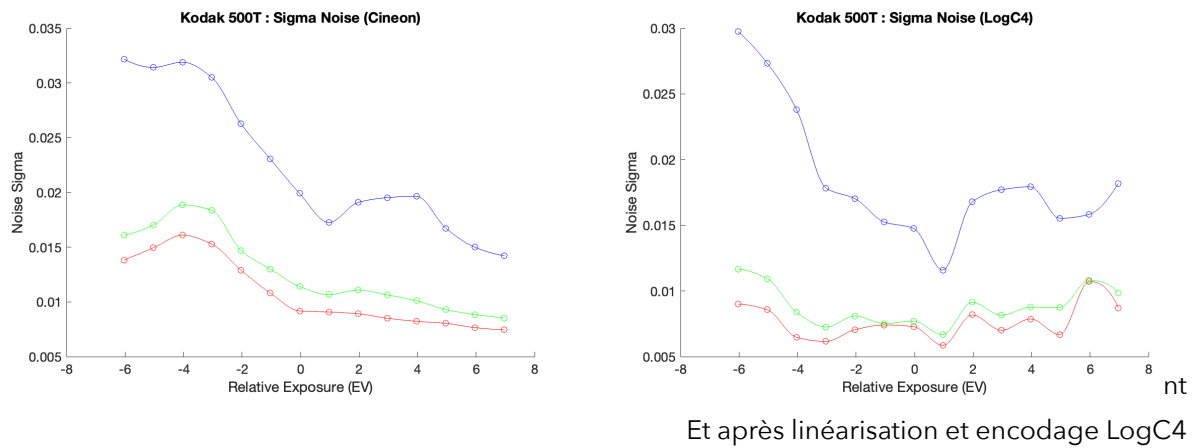
Figure 38 - Courbe caractéristique 500T linéarisée

Comme introduit précédemment, le processus de linéarisation du film consiste à équilibrer les blancs du signal tout en le linéarisant. Les résultats de la linéarisation sont ensuite convertis en LogC4. De plus, nous avons décidé de tracer uniquement la partie avant l'épaule car le bruit était trop présent en raison du gain important de la linéarisation nécessaire à ces derniers stops pour maintenir un comportement linéaire.

Les facteurs de gain plus élevés nécessaires pour linéariser l'épaule de la courbe caractéristique du film sont directement visibles dans les tracés de bruit sigma présentés dans la figure 39 et plus spécifiquement dans la modification de forme.

Il est intéressant de noter que nous obtenons une tendance opposée avec des valeurs moyennes qui sont effectivement réduites par la linéarisation, ce qui donne un bruit Sigma plus faible en LogC4 qu'en Cineon.

Globalement, nous observons une pente plus élevée dans le domaine de densité, conduisant ainsi à une réduction globale du sigma dans le domaine LogC4 après linéarisation.



Le bruit a une puissance relativement stable sur toute la plage d'exposition, ses valeurs maximale et minimale étant d'un facteur 2 l'une de l'autre.

Sur le plan spatial, le film présente un bruit spatialement corrélé avec des kernels de filtrage dérivés de l'autocorrélation (R, V, B) et de la corrélation croisée (RG, GB, BR) calculées affichées dans la figure 40

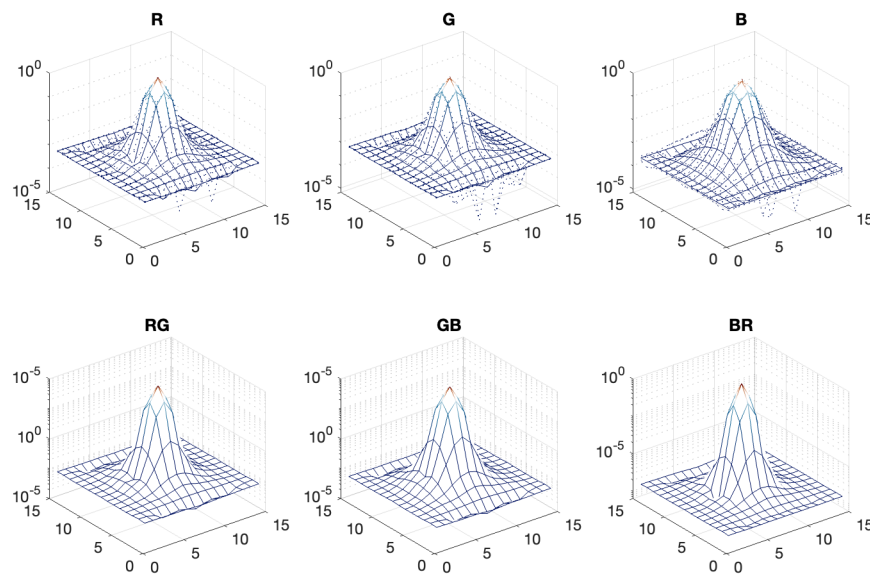


Figure 40 - Corrélation spatiale des grains 500T - Échelle logarithmique

NB : Les kernels d'Autocorrélation sont représentés en domaine log pour voir précisément les faibles valeurs du kernel. Cela pourrait cependant les exagérer et donner une mauvaise représentation visuelle du kernel.

Dans le tracé Noise Frequency Response (Figure 41) calculés à partir des kernel d'autocorrélation, nous pouvons remarquer des grains de plus grande taille dans la couche sensible au bleu, le rouge et le vert étant plus petits et plutôt similaires.

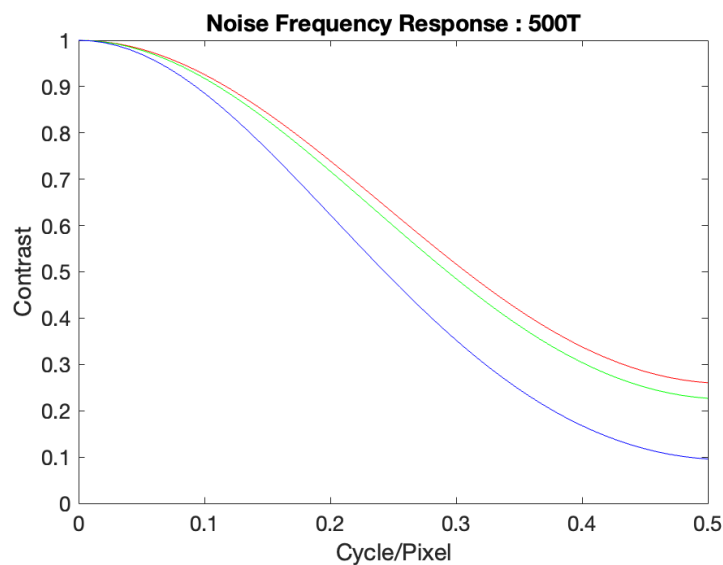


Figure 41 - Réponse en fréquence du bruit moyenne (et 1D)
Kodak 500T

L'un de nos résultats nous a légèrement surpris car nous avons introduit une hypothèse divergente dans la section Contexte sur la taille des grains (halogénure) et la corrélation spatiale pour les films négatifs couleur. Pour rappel, l'hypothèse était que la taille des grains (nuage de colorant développé) n'était pas liée à l'halogénure dont ils sont issus. Cependant, selon la figure 42, nous pouvons constater une tendance à la diminution de la taille des grains lorsque l'exposition augmente.

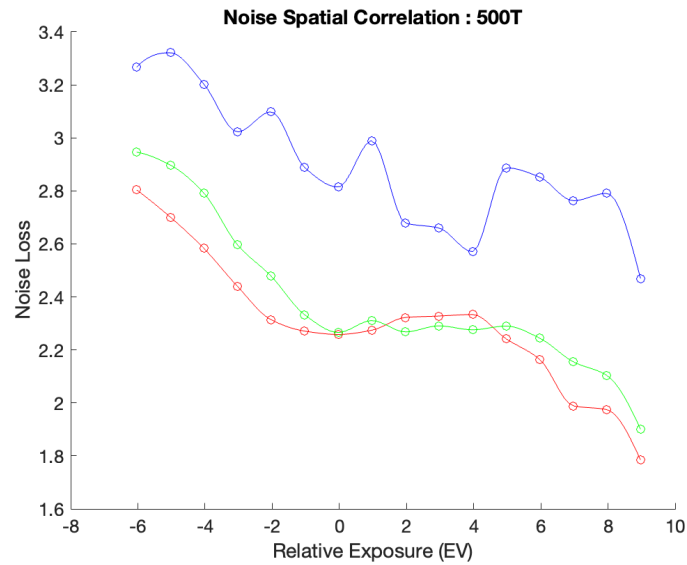


Figure 42 - Taille de la corrélation spatiale du bruit
Kodak 500 T

NB : La Perte de Bruit est une métrique qui n'a pas encore été introduite. Cela n'a pas été expliqué dans la section Contexte car il s'agit plutôt d'une métrique faite maison que nous trouvons pertinente et utile.

La métrique peut être définie comme telle :

$$\text{Considérons } Noise_{input} * Ker = Noise_{Output}$$

avec $Noise_{input}$ étant n'importe quel bruit de distribution Normale

$$NoiseLoss = \frac{\sigma_{Input}}{\sigma_{Output}}$$

Étant σ_{Input} l'écart type de $Noise_{input}$ et σ_{Output} de $Noise_{Output}$

NB : Les coefficients de corrélation de couches obtenus avec l'équation 4.14 ne sont pas montrés, car constants sur toute l'étendue utile.

Alexa 35

En exécutant l'algorithme sur les plaques de grain (ou flat field) que nous avons capturées avec l'Alexa35 à EI200, nous avons trouvé des résultats radicalement différents en termes de réparation du bruit. Nous pouvons voir un faible bruit dans les extrémités inférieure et supérieure de la plage d'exposition, les valeurs les plus élevées étant situées dans la section d'ombre (allant de -6 à 0 EV). Le petit gain de bruit à +2 EV *pourrait* être une conséquence du capteur à double gain qu'est l'Alev4.

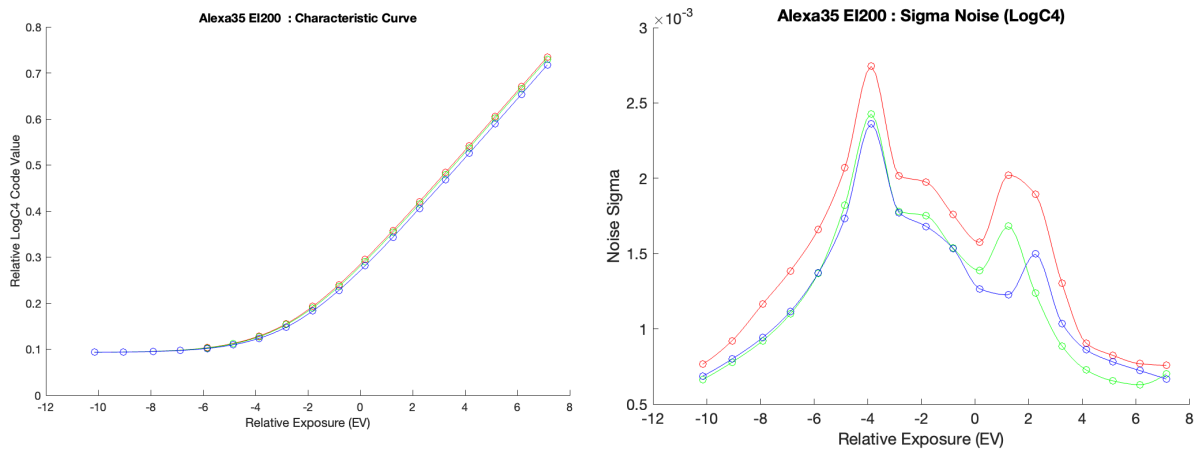


Figure 43 - Courbe caractéristique et bruit Sigma, Alexa 35 EI200

La corrélation spatiale moyenne du bruit est celle attendue d'un capteur débayerisé avec une corrélation spatiale plus élevée pour le rouge et le bleu. En effet, leurs résolutions (pattern dans le Bayer CFA) sont la moitié de celle du canal Vert augmentant ainsi la taille de la corrélation spatiale. Le vert obtient logiquement une corrélation spatiale plus faible car il a une résolution plus élevée. De plus, les images sont en également filtrées par la texture standard Alexa 35 modifiant la corrélation spatiale de chaque canal.

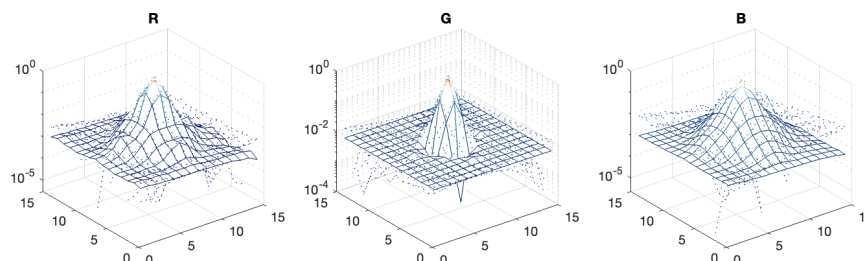


Figure 44 - Corrélation spatiale du bruit RVB Alexa 35 EI 200

Dans les tracés de corrélation spatiale du bruit suivants, nous ne pouvons pas identifier de corrélation entre la taille des grains et l'exposition. Nous pouvons encore identifier une diminution de la perte de bruit à +1 EV dans le canal rouge créée par un comportement d'accentuation identifié à ce niveau d'exposition. Dans l'ensemble, les couches bleues présentent une granulométrie similaire entre

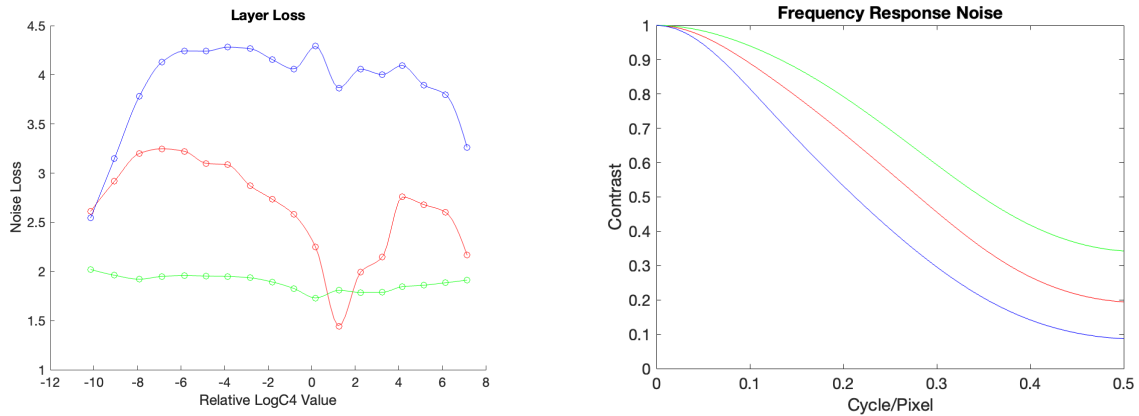


Figure 45 - Alexa 35 EI 200- Corrélation spatiale et réponse en fréquence moyenne

Les résultats de corrélation de couches provenant de notre algorithme d'optimisation basé sur les coefficients de Pearson et du modèle théorique qui le sous-tend ne fonctionnent pas pour ce type de bruit. Comme les données brutes bayerisées présente un bruit non corrélé au niveau spatial et au niveau des canaux (les canaux RVB n'existent même pas encore), la débayerisation corrèle le bruit dans les deux sens (spatial et coloré). Cela signifie que la somme du bruit non corrélé pour modéliser le grain du film n'est plus valable car un processus plus avancé a lieu dans la corrélation du bruit de l'Alexa 35. L'algorithme a du mal à trouver un résultat plausible pour l'optimisation donnant ainsi des résultats erronés (non montré dans ce mémoire car non utilisés).

5 - Émulation de texture de film

5.1 Rendu des détails

Pour rappel, nous avons construit le Rendu de Détails (RoD) basé sur des techniques de filtrage classiques à la fois dans les domaines linéaires et logarithmiques. Comme expliqué dans la section 4.1, nous avons basé notre analyse sur l'ajustement de la courbe MTF en minimisant la distance euclidienne d'une MTF cible et d'une MTF d'entrée. Dans notre cas, notre MTF cible était le film tandis que celle d'entrée était Alexa35. Le modèle sur lequel était basée notre optimisation était un mélange de filtrage dans le domaine linéaire pour le flou et dans le domaine logarithmique pour la netteté tout en prenant en compte l'halation.

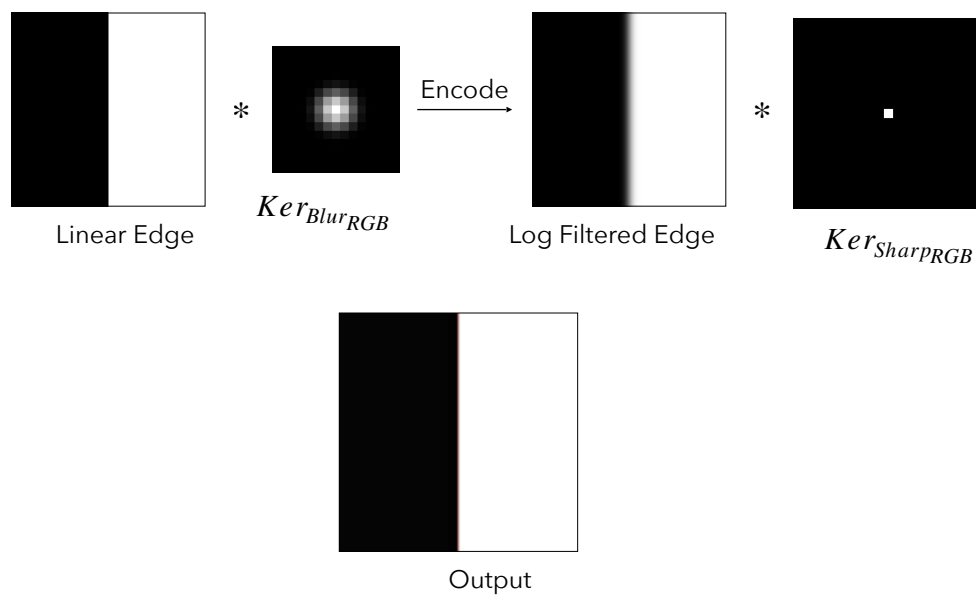


Figure 23 - Traitement Edge RoD

Les kernel sont générés sur la base des équations 4.1 et 4.2

5.2 Halation

Le pipeline de traitement de l'Halation n'a pas encore été entièrement décrit malgré les nombreuses caractéristiques qui ont été introduites dans la section 4.2. Nous pouvons décrire le pipeline comme suit :

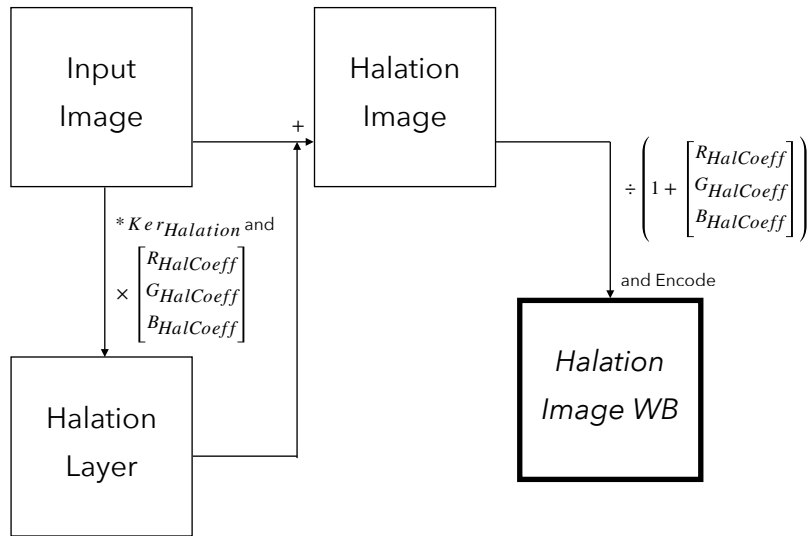


Figure 46 - Principe de traitement de l'halation

Le traitement de Halation est simple et repose uniquement sur un filtrage avec un kernel de taille unique ainsi que sur les coefficients de Halation précédemment calculés.

NB : La division par les coefficients de Halation lors de la dernière étape assure la cohérence des valeurs de niveaux de gris après traitement. Ceci est recommandé, car si cela n'est pas pris en compte, l'exposition ainsi que la valeur des niveaux de gris varieront considérablement.

5.3 Grain

Après avoir exécuté notre algorithme d'analyse sur nos images de film et récupéré les résultats présentés dans la section 4.3.4, nous pouvons commencer et réfléchir à un

algorithme qui nous permettra de synthétiser la structure des grains que nous venons d'analyser.

Les mesures que nous récupérons sont discrètes et doivent être interpolées et extrapolées pour couvrir toute la plage LogC4 [0,1].

Différentes méthodes sont appliquées en fonction de la caractéristique du bruit que l'on souhaite extrapoler.

SigmaLUT

La LUT sigma décrit la relation entre la valeur du code LogC4 d'entrée et les écarts types ou les bruits directeurs (en RVB) qui lui sont associés. L'extrémité inférieure est extrapolée en prenant comme référence le sigma du bruit du support+voile, l'extrémité supérieure est extrapolée avec un écart type de bruit cible de 0 car la valeur maximale LogC4 est considérée comme sans bruit.

La valeur maximale de LogC4 est située à +11,35 stops au-dessus du point gris et la valeur maximale du film a été considérée comme située autour de +7 ou 8 arrêts car la non-linéarité du film devient trop importante.

Corrélation des couches

Les coefficients de corrélation des couches sont constants sur toute la plage d'exposition. Nous utiliserons donc une valeur moyenne pour chaque canal de corrélation entre RG, GB et RB.

Corrélation spatiale - Taille des grains

Comme le montre la figure 42 la taille des grains varie en fonction de l'exposition. Si une LUT sigma de bruit (noise sigma LUT) est facile à mettre en place dans un algorithme, faire varier la taille des filtres en fonction des valeurs de l'image est plus difficile car le temps de calcul est largement multiplié. Pour atténuer ce problème de temps de calcul, nous avons décidé de créer un deuxième pipeline de traitement reposant sur un seul kernel moyenné pour chaque canal. On se retrouve alors avec des grains de taille unique pour conserver des temps de calculs raisonnables.

5.3.1 Génération de bruit

Au début du processus, un AWGN (Additive White Gaussian Noise) centré, réduit ($\mu = 0$ et $\sigma = 1$) est généré. À ce stade, le grain est totalement décorrélé. Nous multiplions notre bruit avec notre image qui a été traité par la Noise LUT (l'entrée étant des valeurs LogC4 et la sortie étant des valeurs de bruit sigma). On peut rappeler ici que :

$$\mathcal{N}(\mu, \sigma) = \mathcal{N}(0,1) \times \sigma + \mu \quad \text{Équation 5.1}$$

On se retrouve avec un AWGN qui présente un écart type lié à la valeur du code LogC4 du pixel auquel il est associé en chaque point de l'image.

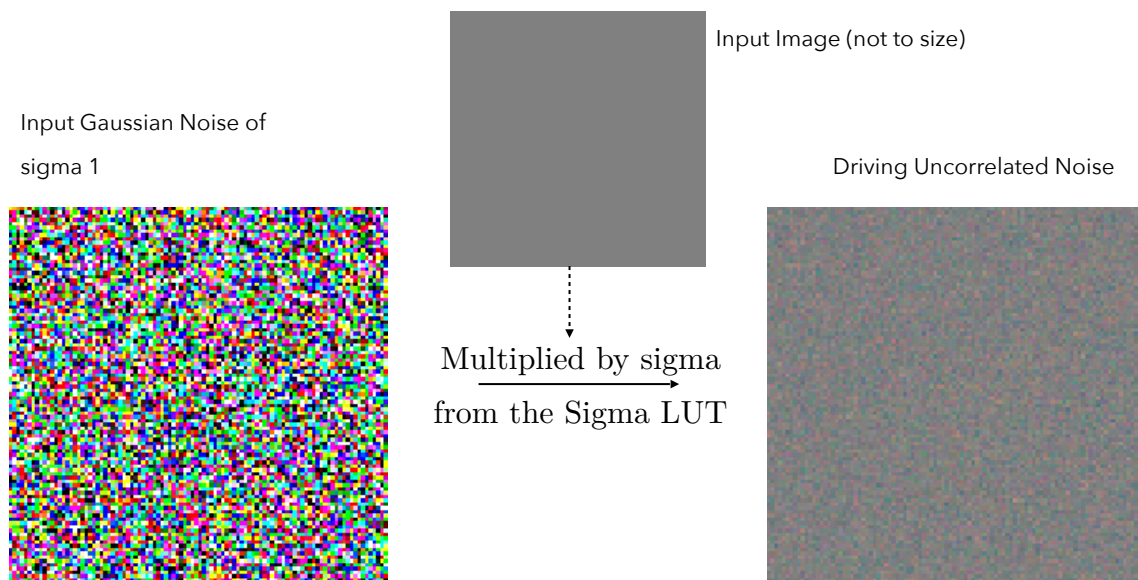


Figure 47 - Génération de bruit
Traitement du bruit Sigma LUT

Voici une équation pour reprendre nos explications précédentes

$$[R_d, G_d, B_d] = \mathcal{N}(0,1) \times LUT_{Noise\sigma}(Image_{Input}) \quad \text{Équation 5.2}$$

avec R_d, G_d, B_d étant les bruits directeurs pour chaque canal

5.3.2 Filtrage

Le filtrage de l'AWGN lui permet d'être corrélé spatialement, lui donnant plus les attributs visuels de grain argentique. Dans notre algorithme, l'étape de filtrage se déroule conjointement avec la corrélation de couches. Comme introduit dans la section 4.3.2, chaque couche est considérée comme un ajout de plusieurs couches (voir les équations 4.19 et 4.20 pour les définitions du kernel).

$$\begin{cases} R_{Noise} = R_d * Ker_R + aG_d * Ker_{RG} + bB_d * Ker_{RB} \\ G_{Noise} = aR_d * Ker_{RG} + G_c * Ker_G + dB_d * Ker_{GB} \\ B_{Noise} = bR_d * Ker_{RB} + cG_d * Ker_{GB} + B_d * Ker_B \end{cases} \quad \text{Équation 5.3}$$

avec a, b, c coefficient de corrélation des couches (respectivement RG, GB, BR)

Ker_R, Ker_G, Ker_B étant les kernels de filtrage respectivement pour les bruits directeurs
R, V, B

$Ker_{RG}, Ker_{GB}, Ker_{BR}$ étant les kernels de filtrage respectivement pour les bruits directeurs
R, V, B

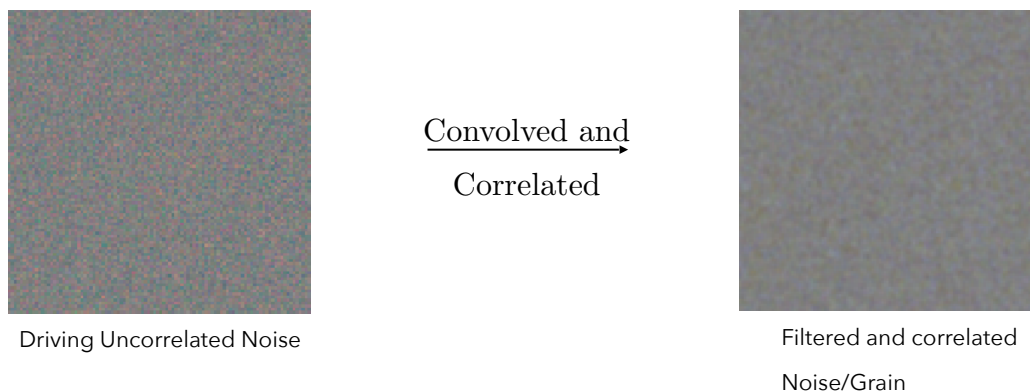


Figure 48 - Filtrage et corrélation du bruit

5.4 Aperçu

Comme expliqué dans les sections précédentes, l'émulation de texture de film fonctionne avec 3 étapes de traitement distinctes qui sont le rendu de détails (RoD), l'Halation et le Grain. Ces caractéristiques doivent être ajoutées aux images numériques dans cet ordre spécifique pour garantir l'aspect correct de la texture du film.

Voir l'annexe 6 pour un schéma complet et plus détaillé de l'ensemble du pipeline.

Comme dans les sections précédentes, prenons un bord parfait (-4 & +4 EV pour le

côté sombre et clair et filtré pour correspondre à la MTF de l'Alexa 35) et traitons-le tout au long du pipeline :

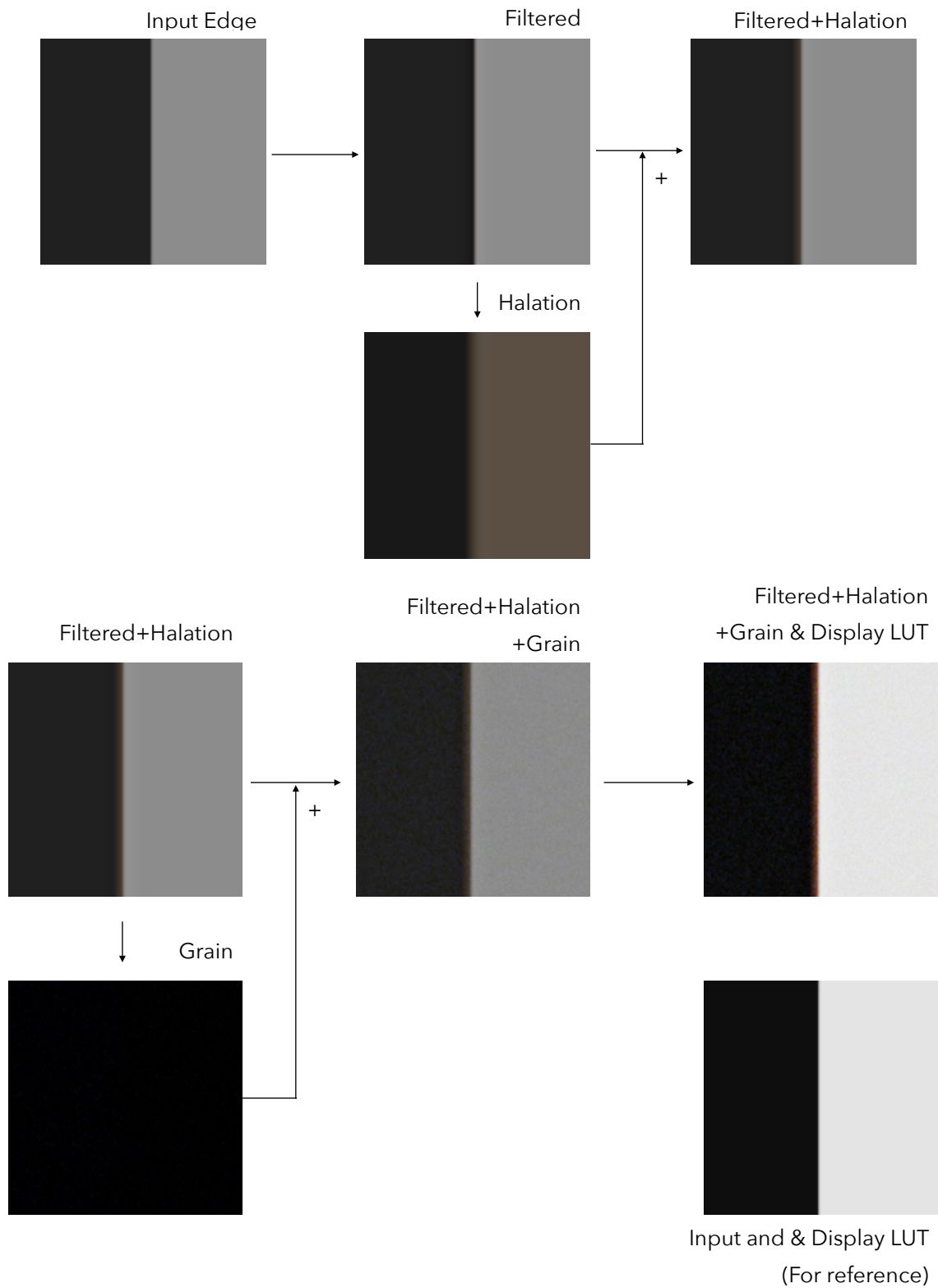


Figure 49 - Pipeline de traitement complet sur un bord synthétique

6 - Évaluation

Nous avons déjà vu que les premiers résultats de la section synthèse sont prometteurs. Cette section est destinée à présenter des résultats objectifs à travers des mesures et des graphiques mais aussi visuellement. Pourtant, force est de constater que cette partie pourrait constituer un mémoire à elle seule. En effet, comme il existe des métriques suivant des normes pour mesurer les différences de couleurs, le RoD et l'Halation ne bénéficient pas de ces métriques spécifiques et psychoperceptives. De plus, l'évaluation des données avec des personnes et non avec des mesures nécessite l'élaboration de protocoles d'évaluation et d'ensembles de données d'évaluation rigoureux. Nous avons construit un ensemble de données d'évaluation qui bénéficierait grandement de mouvement (nous avons uniquement pris des photos) et, plus important encore, de la diversité des scènes. Cela impliquerait de tourner avec une équipe assez nombreuse et de créer des scènes élaborées pour tirer le meilleur parti de l'évaluation.

6.1 Mesures objectives

6.1.1 Analyse du bruit

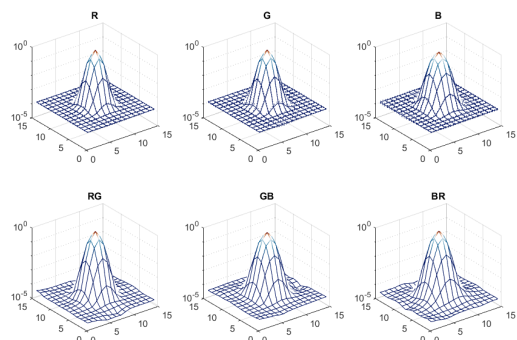
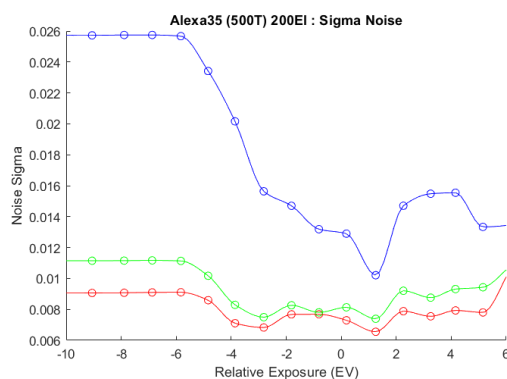


Figure 50 – Bruit Sigma et corrélation spatiale de texture de film émulée sur Alexa 35 @ EI 200

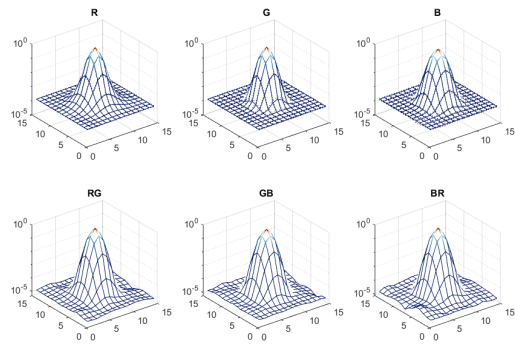
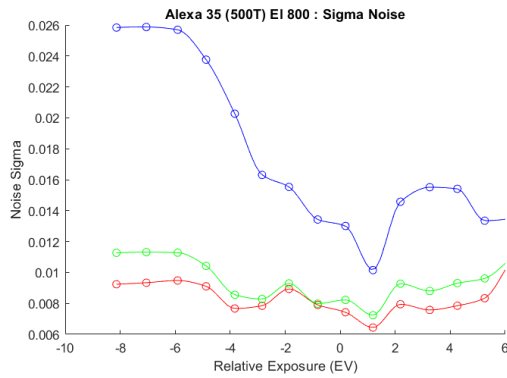


Figure 51 - Bruit Sigma et corrélation spatiale de texture de film émulée sur Alexa 35 @ EI 800

Pour rappel, 500T a été mesuré comme

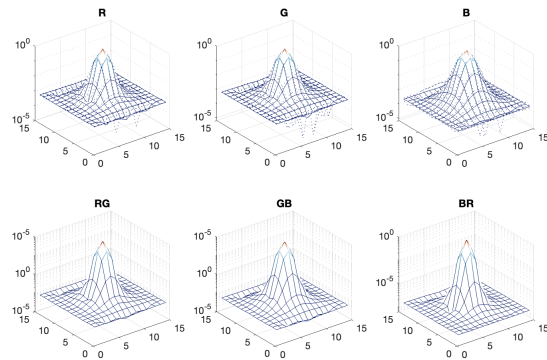
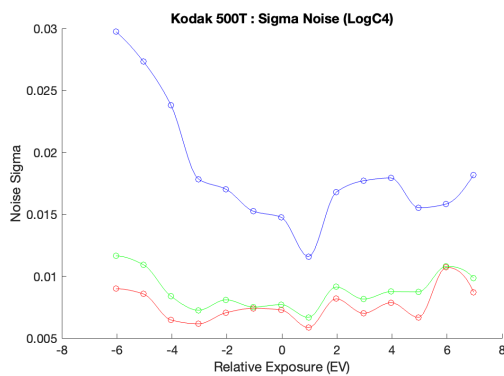


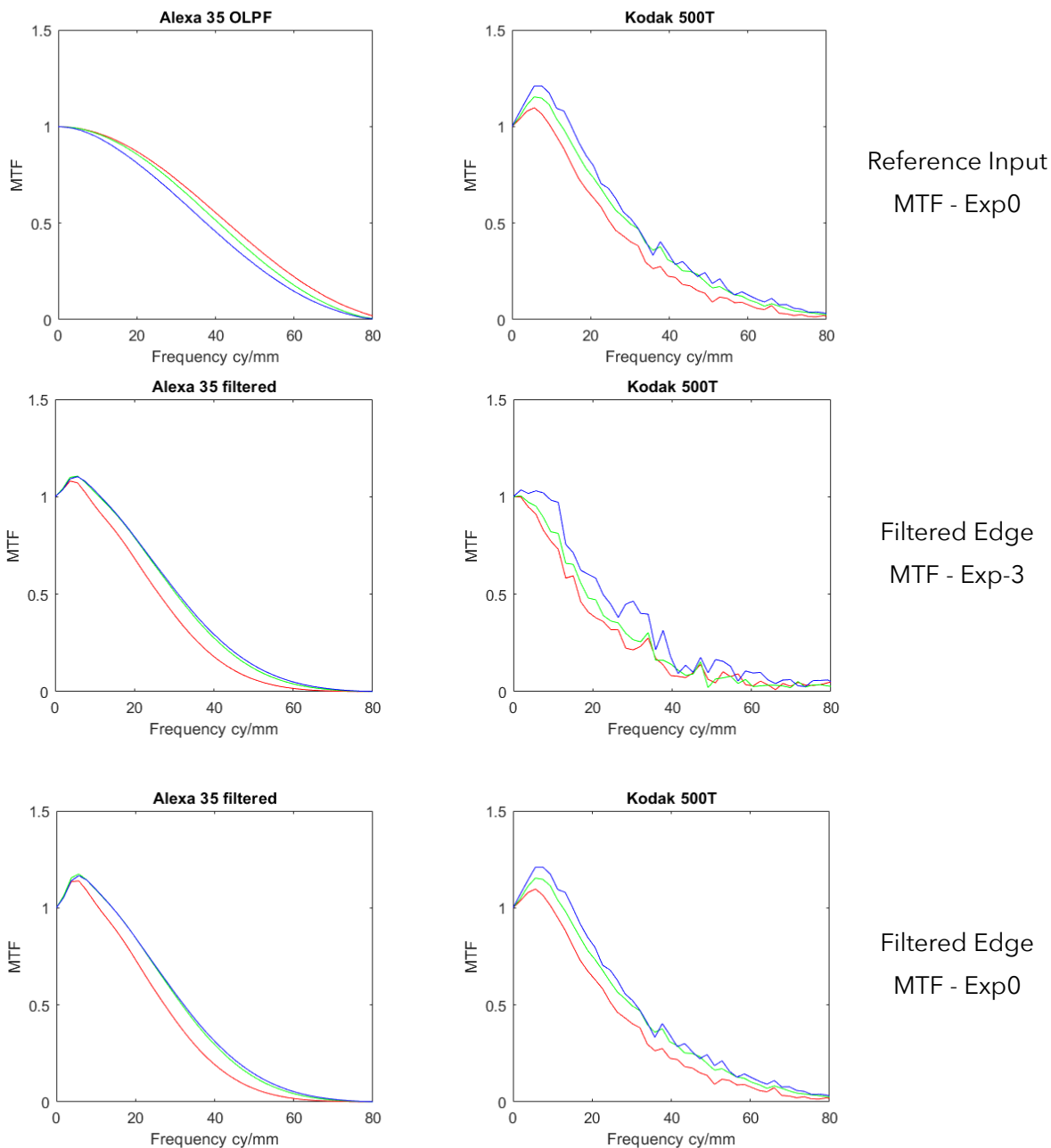
Figure 52 - Bruit Sigma et Corrélation spatiale de 500T

On peut constater que l'émulation est une réussite tant en termes de puissance que de corrélation spatiale. Les divergences dans la visualisation de la corrélation spatiale sont dues aux valeurs négatives de l'AutoCorrelation du film et de la représentation logarithmique. Des valeurs EI plus élevées sont plus difficiles à réaliser car le bruit du capteur commence à perturber le grain synthétisé. En effet, même s'il n'est pas présenté dans ce mémoire, le bruit de l'EI 3200 n'est pas entièrement couvert par l'émulation de la 500T, notamment dans les basses lumières et les tons moyens.

Le filtrage de RoD réduit le grain car il est basé sur des kernel de filtrage gaussien, mais l'effet n'est pas suffisant.

6.1.2 Mesures MTF

Afficher ici sont des bords artificiels (convolués avec un kernel imitant l'OLPF de l'A35) traités avec l'algorithme présentés avec la MTF du film correspondante pour diverses expositions (-3,0,+3)



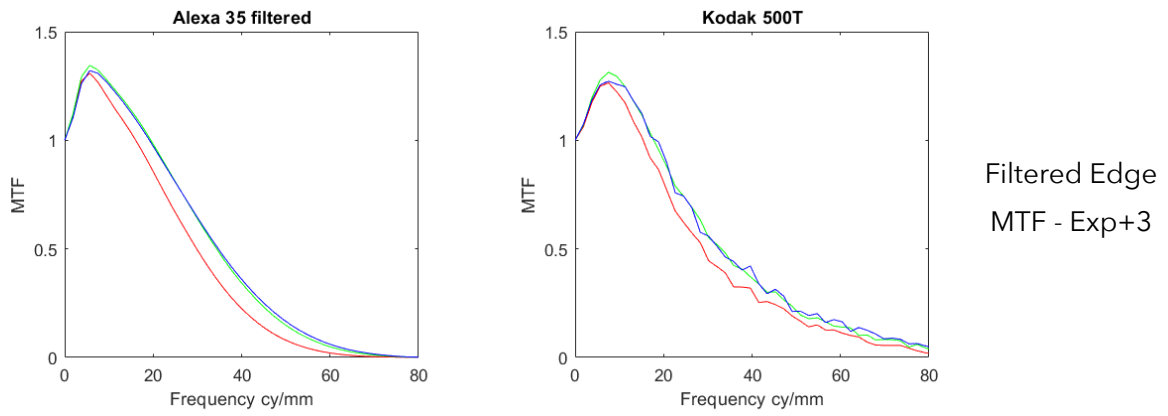


Figure 53 - Mesure MTF de Bord filtré par l'algorithme RoD

6.1.3 Évaluation des couleurs

Ces ΔE_{2000} ont été calculées entre la Kodak 500T et l'Alexa35 corrigée avec différents degrés de RPCC.

	NoCorrection	3x3 Matrix	RPCC degree 2	RPCC degree 3
Mean ΔE_{2000}	3.69	2.22	2.04	1.93
Best 90%	3.31	1.89	1.74	1.65
Worst 10%	7.15	5.14	4.79	4.47

Figure 54 - ΔE_{2000} de différents degrés RPCC

6.2 Évaluation visuelle

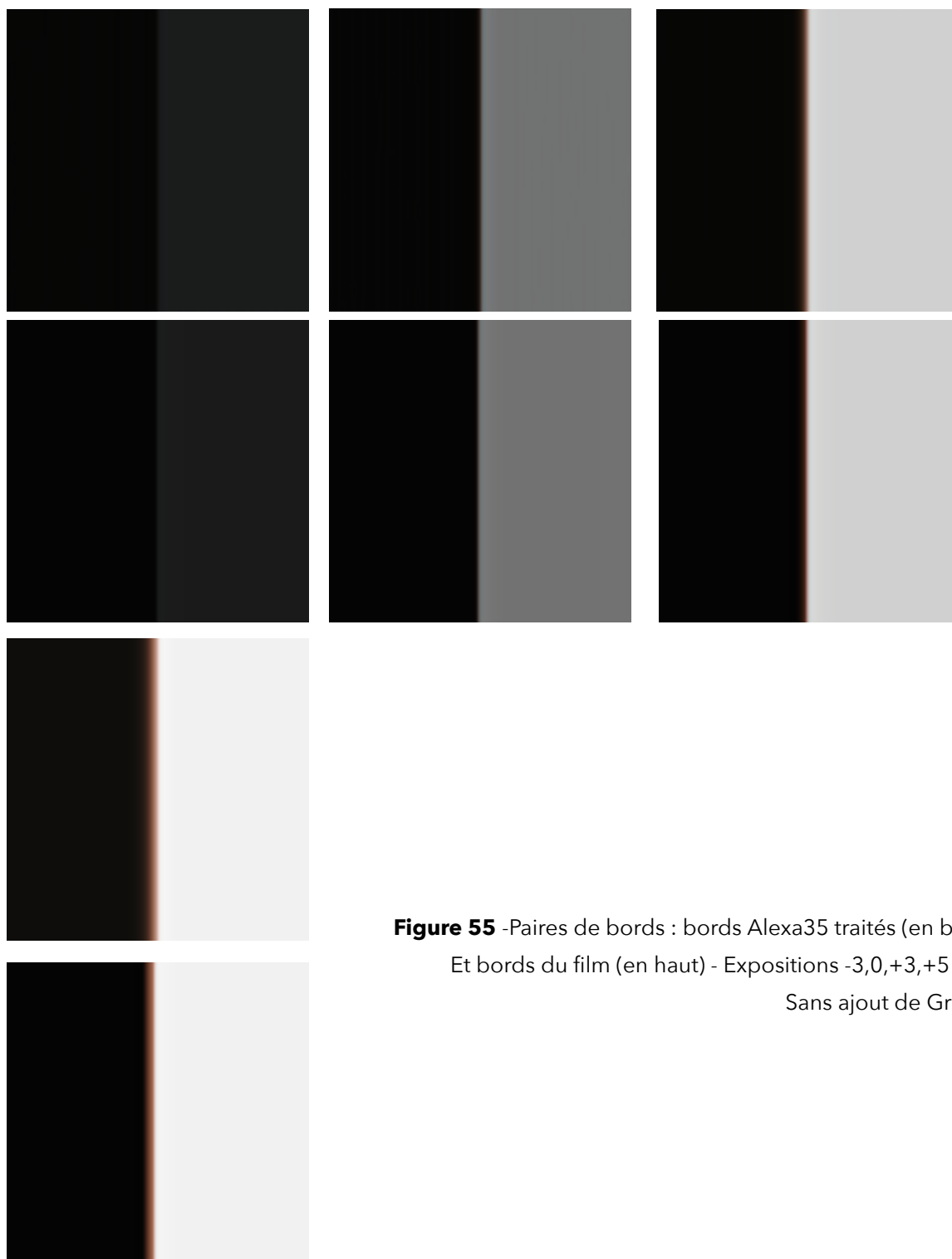


Figure 55 -Paires de bords : bords Alexa35 traités (en bas)
Et bords du film (en haut) - Expositions -3,0,+3,+5 EV
Sans ajout de Grain

Cette section présente les résultats visuels de la synthèse d'émulation que nous avons créée à travers ce mémoire. Les bords (Fig. 55) sont synthétiques et pré-filtrés pour correspondre à l'Alexa OLPF. Les bords du film sont le résultat d'une concaténation de l'ESF.

Les résultats sur les images réelles ne sont pas corrigés en couleur mais bénéficient du pipeline d'émulation complet avec filtrage RoD, Halation et ajout de Grain. Des images traitées supplémentaires peuvent être fournies au lecteur sur demande.



Figure 56 - Recadrages des images d'évaluation -
Film (en haut) Traité Alexa 35 (en bas).

7 - Partie pratique : Omniprésence de la Mine

La littérature conventionnelle de traitement des images fait référence à la texture comme caractéristique du sujet photographié. Cependant, dans ce mémoire, nous avons abordé la texture photographique se définissant en partie comme étant intrinsèquement lié au support de captation. Il nous a en effet paru important d'apposer à la définition stricto sensu, des notions décrivant le caractère visuel singulier apporté ni par l'objectif ni par le sujet, mais dépendant uniquement du support de captation et de ses spécificités. En photographie analogique, on rencontre alors des caractéristiques visuelles apportées par la matérialité du support, notamment son épaisseur, mais plus essentiellement la diversité en taille de ses cristaux sensibles. Cette répartition stochastique responsable de la captation des photons, mais également du bruit analogique présent sur l'image finale tranche radicalement à la matrice de captation ordonnée et sans épaisseur en photographie numérique. La texture de l'image numérique ne dépend alors plus de son support et de sa matérialité. Néanmoins, en dépit d'une image immatérielle tant visuellement que techniquement, la caméra et le processus de traitement numérique dépend eux de ressources matérielles tangibles et mesurables. La mine, absente de nos imaginaires collectifs, s'immisce pourtant dans la totalité des activités humaines. Paradoxalement, la dépendance à la Terre et ces ressources minières est importante et grandie à mesure que nous dé-matérialisons nos données, nos services et nos pratiques. Délocalisées au profit du marché libre, la Mine et ses grandes industries ne sont plus en Europe et leur absence accentue ce paradigme dé-matérialiste. Des traces et vestiges de la mine ont cependant subsisté et marquent avec véhémence les territoires qu'elle a un jour écorchés. De plus, la mine n'est pas complètement sortie d'Europe et compte d'ailleurs y revenir pour en renforcer la souveraineté.

Ce projet documentaire se présente comme une représentation de la mine en Europe de l'Ouest. En faisant un détour par la Pologne et l'Allemagne, Omniprésence de la Mine se concentre sur les territoires du Massif Central et des Pyrénées. La géologie y

étant diversifiée et les terres pas toujours évidentes à cultiver, se sont développées des mines de tout métaux et minerais. Certaines exploitations remontent jusqu'à l'antiquité, mais la plupart ont été pleinement exploitées depuis la révolution industrielle. Le charbon, qui en est la représentation ultime, a commencé à être exploité dans les Houillères de la Loire avant de s'étendre à l'Auvergne, au Midi-Pyrénées et aux Cévennes. Sur des modèles et apparences similaires existent également des exploitations de minerai métalliques. Du Zinc au Plomb en passant par l'Or et l'Arsenic, les métaux sont souvent exploités ensemble et nécessitent un raffinage coûteux pour en extraire les infimes quantités contenues dans la roche. Les déchets sont difficiles à traiter et sont continuellement stockés dans des retenues, tas de stérile et autres déversoirs. Les conditions de travail, bien qu'hypothétiques, sont sûrement difficiles et les risques importants.

Conclusion et perspectives

Historiquement, le terme "texture" était utilisé pour décrire les caractéristiques de la scène, excluant les attributs spatiaux de la surface sensible utilisée pour la captation. Si le grain et le rendu de détails ont été des aspects notables pour les photographes et cinéastes, ils ne considéraient pas ces attributs du film comme pleinement intégrés à la notion de texture. L'avènement des caméras numériques dans l'industrie cinématographique a été accompagné de commentaire témoignant d'un "manque de look", tant au niveau des couleurs que des textures.

Pour remédier à ces lacunes spatiales, l'utilisation d'objectifs vintage avec des caméras numériques s'est généralisée pour atténuer leur netteté inhérente. Plus récemment, des plug-ins et des logiciels ont tenté d'émuler le film afin de retrouver la profondeur matérielle des images, perdue par les capteurs numériques. Les ateliers de post-production ont également proposé des solutions intégrant des éléments analogiques pour modifier les caractéristiques spatiales du matériel photographique de sortie.

À une époque où les usages deviennent de plus en plus numériques et éthérés, le sentiment de matérialité devient de plus en plus précieux.

Ce mémoire, mené sous la supervision d'ARRI, était directement aligné sur les besoins des cinéastes. Le sujet a été suggéré par le département Image Science d'ARRI pour explorer les possibilités et la faisabilité de l'émulation de la texture filmique. Un semestre de cours en traitement d'images à Sorbonne Université était une condition préalable au stage, permettant d'explorer et de déterminer les paramètres influençant la texture. Nous avons identifié trois caractéristiques clés : le Grain, le Rendu de Détails et l'Halation. Des tests et des mesures ont été effectués pour acquérir un ensemble de données afin d'extraire les paramètres de ces caractéristiques. L'analyse et la synthèse ont impliqué à la fois un traitement de la couleur et un traitement spatial, nécessitant également des connaissances en optique et une compréhension approfondie de la sensitométrie des films.

Les bons résultats de ce mémoire confirment la possibilité de récupération des caractéristiques définissant la texture filmique et son émulation. Pourtant, comme pour tous les travaux de recherche, des améliorations visant à obtenir des résultats plus fidèles peuvent encore être mises en œuvre et des sujets nouveaux ou existants pourraient être explorés plus en profondeur.

En effet, des protocoles plus précis pourraient être élaborés aussi bien pour l'évaluation des couleurs que pour les mesures MTF. Le premier pourrait largement bénéficier d'une mesure approfondie de la sensibilité spectrale d'un film, tandis que le second pourrait bénéficier d'une meilleure gestion ou correction des aberrations optiques et du flare sur les réponses fréquentielles mesurées et l'évaluation de la couleur de l'Halation.

En outre, des données de validation avec davantage de scènes filmées et des protocoles d'évaluation plus rigoureux pourraient être mis en place, comme abordé dans la section 6. Enfin, la construction d'un modèle de synthèse paramétrable serait un point à développer dans de futurs travaux, bien qu'ils aient commencé à être abordés dans ce travail. Cela nécessiterait cependant des tests approfondis avec un panel d'observateurs étendu pour déterminer comment généraliser et extrapoler les acquisitions de données discrètes, ainsi que déterminer la plage de fonctionnement acceptable de chaque paramètre.

Néanmoins, le mémoire offre une compréhension approfondie de la manière dont la texture, peut être considérée et modélisée. Il démontre le rôle crucial de la matérialité, au sens de cristaux photosensibles, de nuages de colorants et d'épaisseur du film, dans la restitution des scènes capturées par les films négatifs couleur. Cette perspective qui constitue l'essence de ce travail écrit est approfondie dans la partie pratique de ce mémoire présentant des images de la croûte terrestre et de ses ressources. Le projet "Omniprésence de la Mine" explore l'impact des mines d'hier et de demain, soulignant que l'exploitation minière, moteur de tous les processus industriels, définit non seulement la texture du film, mais aussi la photographie numérique, aussi intangible soit-elle.

Liste des acronymes

ADA	ARRI Debayering Algorithm
AWG4	ARRI Wide Gamut 4
AWGN	Additive White Gaussian Noise
CFA	Color Filter Array
CDD	Channel Dependent Densities
CID	Channel Independent Densities
ESF	Edge Spread Function
FFT	Fast Fourier Transform
LUT	LookUp Table
LSF	Line Spread Function
MTF	Modulation Transfer Function (FTM en Français)
OLPF	Optical Low Pass Filter
PFE	Print Film Emulation
PSD	Power Spectral Density
PSF	Point Spread Function
RoD	Rendition of Detail
SNR	Signal to Noise Ratio

Glossaire

Débayerisation

La débayering est l'étape qui permet de récupérer les valeurs manquantes d'une image provenant d'un capteur filtré selon le motif Bayer. Le terme approprié à utiliser devrait être dématricage, car un motif Bayer est simplement un type de réseau de filtres colorés. Pourtant, comme les modèles Bayer sont les CFA les plus utilisés dans l'industrie, le mot « débayerisation » est largement accepté. La débayerisation simple peut être linéaire et donc facilement inversée si l'algorithme dépend d'une méthode de moyenne simple basée sur les pixels du voisinage. Cependant, les algorithmes de débayerisation plus avancés ont tendance à dépendre du contenu de l'image, comme la localisation des contours, ce qui donne des images moins affectées par le moiré ou les artefacts spatiaux.

Transformée de Fourier

Une transformée de Fourier est une opération mathématique qui décompose un signal avec les fréquences qu'il contient. Dans les images, les hautes fréquences représentent des bords nets et de petits détails (donc principalement des régions à contraste élevé) et les basses fréquences représentent des régions peu détaillées et homogènes.

LUT

Une table de recherche est un objet qui permet de stocker des données et dont le but principal est de faire correspondre les valeurs d'entrée à celles de sortie. Ces tables peuvent avoir de nombreuses dimensions et peuvent être utilisées pour la gestion des couleurs et plus largement d'autres tâches de traitement d'image comme la répartition du bruit.

Matrice

En traitement d'image, une matrice est un tableau composé de coefficients mélangeant le niveau de chaque couleur primaire. Les matrices font partie des corrections de couleurs les plus élémentaires dans le traitement des images. Les matrices standard sont 3x3 et offrent une combinaison linéaire de primaires RVB, mais des modèles plus évolués peuvent mélanger des combinaisons RVB et non

linéaires de ces primaires, telles que des matrices de correction de couleur polynomiale racine.

Courbe tonale - Cartographie des tons

Une courbe tonale est une courbe qui décrit la gradation tonale d'une image. Cette courbe est dite linéaire lorsque la gradation numérique de l'image est la même que la quantité de lumière qu'elle reçoit de la scène. En photographie, les fichiers bruts ont généralement un encodage linéaire, alors que le cinéma a tendance à encoder avec une courbe logarithmique pour contrecarrer la sur quantification des hautes lumières et gagner du poids sur les fichiers enregistrés.

Bruit

Le bruit est défini comme un signal supplémentaire indésirable capturé par un appareil de mesure. Il existe différentes sources de bruit comme le bruit photonique, le bruit de lecture, le bruit thermique... Plus que différentes sources, le bruit peut avoir de multiples formes, décrites grâce à ses spectres. Dans la plupart des cas, le bruit réduit généralement la lisibilité d'une image. Or certains types de bruit peuvent être recherchés pour homogénéiser une image, améliorer la netteté ou alterner volontairement leur image. De plus, le bruit peut permettre de réduire les bandes de quantification et d'augmenter la lisibilité du signal grâce à l'effet de résonance stochastique. Il est physiquement impossible d'obtenir des images sans bruit sans aucun traitement d'image (débruitage), ce qui rend la discipline vraiment attractive lorsque l'on souhaite obtenir de tels résultats.

Courbe caractéristique - Courbe H&D

La courbe caractéristique d'un film est donnée par la quantité de densité produite par un film développé lorsqu'il est exposé à une quantité définie de lumière. La réponse sensitométrique d'un film est mesurée à l'aide d'un coin à gradins avec une gamme de zones ayant un delta de densité fixe les séparant. La réponse sensitométrique est utilisée pour définir la sensibilité d'un film selon les normes ISO et permet de déterminer toute métrique définie pour la mesure du contraste (gamma, Indice de Contraste...). Même si le nom H&D semble se rapporter à H (luminance) et

D (Densité), il est en réalité attribué à Hurter & Driffield, fondateurs de la sensitométrie.

Liste des figures

Figure 1 - Matrice de Bayer & sensibilité spectrale du capteur

Figure 2 - B&W Film - Quantum Sensitivity and Characteristic Curves of single size halides

Figure 3 - Ilford Ortho Plus & Ilford HP5 Plus - B&W , Spectral Sensitivity - Ilford

Figure 4 - Overview of the image processing tools

Figure 5 - Balance des Blancs

Figure 6 - Schéma de débayerisation

Figure 7 - Principe de codage logarithmique

Figure 8 - Tone mapping typique en forme de S

Figure 9 - Transformation de l'espace colorimétrique dans un diagramme de chromaticité

Figure 10 - Courbe encodée en Gamma et sa correction

Figure 11 - Principe de convolution

Figure 12 - Principe du produit MTF

Figure 12 - Principe de calcul MTF

Figure 13 - Principe de calcul du pseudo NPS

Figure 14 - Plage d'exposition et répartition des stops

Figure 15 - Simulation théorique de l'ESF et de la diffraction en lame de couteau

Figure 16 - MTF50 concernant la position - Numérique et Film

Figure 17 - Pipeline ACES - ADX10ToAP0

Figure 18 - Traitement des couleurs - AP0ToLogC4

Figure 19 - Couleurs Alexa 35 vers Couleurs Color

Figure 20 - rappel du principe de MTF

Figure 21 - Position stochastique des halogénures ou mouvement des halogénures

Figure 22 - pipeline pour RoD

Figure 23 - Traitement et calcul de MTF pour le RoD

Figure 24 - Paramètres RoD issus de la fonction d'optimisation -
Entrée : Alexa35, sortie : 500T

Figure 25 - Paramètres moyens issus de l'optimisation RoD
Entrée : Alexa35, sortie : 500T

Figure 26 - Schéma de profondeur de champ

Figure 27 - Photons to photos : schéma CRA

Figure 28 - Loi de Snell-Descartes

Kodak 500 T

Figure 29 - Film découpé avec couches et remjet, diffusion de Mie.

Figure 43 - Courbe caractéristique et bruit Sigma, Alexa 35 EI200

Figure 31 - Rapport d'Halation. (5px)

Figure 44 - Corrélacion spatiale du bruit RVB Alexa 35 EI 200

Figure 32 - Tobias Deml, Halation schematic

Figure 45 - Alexa 35 EI 200- Corrélacion spatiale

Figure 33 - LP Clerc , Théorie photographique

et réponse en fréquence moyenne

–

La Technique Photographique, Schéma de l'halation

Figure 46 - Principe de traitement de l'halation

Figure 34 -Extrapolation des sigma des kernels de filtrage

Figure 47 - Génération de bruit Traitement du bruit Sigma LUT

Figure 35 - Kernel d'Halation écart type Ecart type du Coefficient d'Halation sur la taille du kernel d'Halation

Figure 48 - Filtrage et corrélacion du bruit

Figure 36 - Rapports de Halation avant et après compensation du filtrage

Figure 49 - Pipeline de traitement complet sur un bord synthétique

Figure 37 - Voisinage pour le calcul de l'AutoCorrelation

Figure 50 - Bruit Sigma et corrélacion spatiale de texture de film émulée sur Alexa 35 @ EI 200

Figure 38 - Courbe caractéristique 500T linéarisée

Figure 51 - Bruit Sigma et corrélacion spatiale de texture de film émulée sur Alexa 35 @ EI 800

Figure 39 - Sigma de bruit (puissance) avant Et après linéarisation et encodage LogC4

Figure 52 - Bruit Sigma et Corrélacion spatiale de 500T

Figure 41 - Réponse en fréquence du bruit moyenne (et 1D) Kodak 500T

Figure 53 - Mesure MTF de Bord filtré par l'algorithme RoD

Figure 42 - Taille de la corrélacion spatiale du bruit

Figure 54 - Δ E2000 de différents degrés RPCC

Figure 55 -Paires de bords : bords Alexa35 traités (en bas)

Et bords du film (en haut) - Expositions
-3,0,+3,+5 EV

Figure 56 - Recadrages des images
d'évaluation -
Film (en haut) Traité Alexa 35 (en bas).

Bibliographie

Grain

- S. Eckel, P. Huthwaite, U. Zscherpel, A. Schumm and N. Paul, *Realistic Film Noise Generation Based on Experimental Noise Spectra*, in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 29, pp. 2987-2998, 2020
- Hanson, Kenneth. (2001). *A Simplified Method of Estimating Noise Power Spectra*. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- A Newson, Julie Delon, B Galerne. *A Stochastic Film Grain Model for Resolution-Independent Rendering*. Computer Graphics Forum, 2017
- B. T. Oh, S. -m. Lei and C. . -C. J. Kuo, *Advanced Film Grain Noise Extraction and Synthesis for High-Definition Video Coding*, in *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 19, no. 12, pp. 1717-1729, Dec. 2009
- J. C. K. Yan, P. Campisi and D. Hatzinakos, *Film grain noise removal and generation for color images*, Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP '98 (Cat. No.98CH36181), Seattle, WA, USA, 1998, pp. 2957-2960 vol.5

Optique, rendu des détails et Halation

- W. F. Berg, *The Photographic Emulsion Layer as a Three-Dimensional Recording Medium*, December 1969 / Vol. 8, No. 12 / APPLIED OPTICS 240

- Roland, Jackson K. M., *A Study of Slanted-Edge MTF Stability and Repeatability*. édité par Mohamed-Chaker Larabi et Sophie Triantaphillidou, 93960L. San Francisco, California, USA, 2015.
- Estriebeau, Magali, et Pierre Magnan. *Fast MTF Measurement of CMOS Imagers Using ISO 12333 Slanted-Edge Methodology*. Edité par Jean-Pierre Chatard et Peter N. J. Dennis, 243. St. Etienne, France, 2004
- Janecek, Martin, et William W. Moses. *Optical Reflectance Measurements for Commonly Used Reflectors*. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 55, n° 4 (août 2008)

Couleur

- R. C. Aster, B. Borchers, and C. H. Thurber, *Parameter Estimation and Inverse Problems, 2nd ed. Elsevier Inc.*, 2013
- Edward J. Giorgianni et Thomas E. Madden, *Digital color management : encoding solutions*, 2008, 415 pages, ISBN : 9780470512449
- Finlayson, Graham & Mackiewicz, Michal & Hurlbert, Anya. (2015). *Color Correction Using Root-Polynomial Regression*. *IEEE transactions on image processing : a publication of the IEEE Signal Processing Society*. 24. 1460-1470. 10.1109/TIP.2015.2405336.
- R.W.G Hunt, *The Reproduction of Colour, 6th Edition*, WILEY, 2004, 724 Pages, ISBN: 978-0-470-02425-6

Image Science

- J.C Dainty and R. Shaw, *Image Science : Principles, Analysis and evaluation of Photographic-Type Imaging Processes*, Academic Press, 1974, 402 pages
- Bergthaller, P. *Couplers in Colour Photography—Chemistry and Function Part 3. The Imaging Science Journal* 50, n° 4 (janvier 2002): 233-76.
- C. Noel Proudfoot. *SPSE Handbook of Photographic Science and Engineering second edition*. New York, IS&T, 1997, ISBN : 0-89208-198-8
- Thomas, Woodlief. *SPSE Handbook of Photographic Science and Engineering*. New York, Wiley, 1973.
- Andrews, Harry C, *Digital image restoration*, Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hall, 1977

Documentation technique et Normes

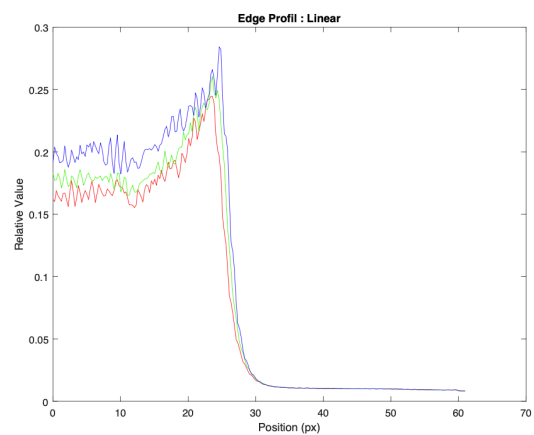
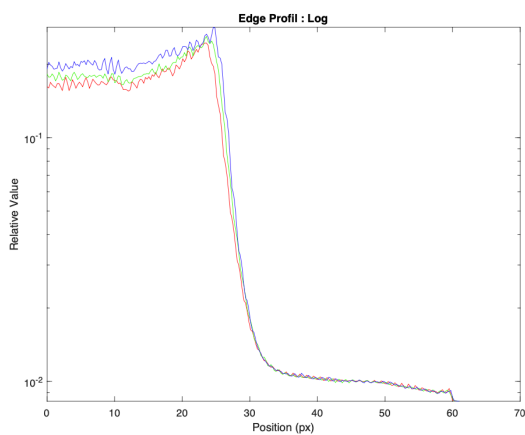
- Eastman Kodak Company, *The essential reference guide for filmmakers*, 213 Pages, 2007, Code: H-845
- KODAK Publication No. H-387, *KODAK Digital LAD Test Image, User's Guide and Digital Recorder Calibration and Aims, December 2011*, 5 pages
- KODAK, *KODAK VISION3 500T Color Negative Film 5219 / 7219 Datasheet*, Revised March 22, KODAK Publication No. H-1-5219, 4 pages
- KODAK, *Print Grain Index KODAK Publication No. E-58, July 2000*
- SMPTE, SMPTE ST 2065-2:2020, *Academy Printing Density (APD) - Spectral Responsivities, Reference Measurement Device and Spectral Calculation*, May 2020
- SMPTE, SMPTE ST 2065-3:2020, *Academy Density Exchange Encoding (ADX) Encoding Academy Printing Density (APD) Values*, September 2020

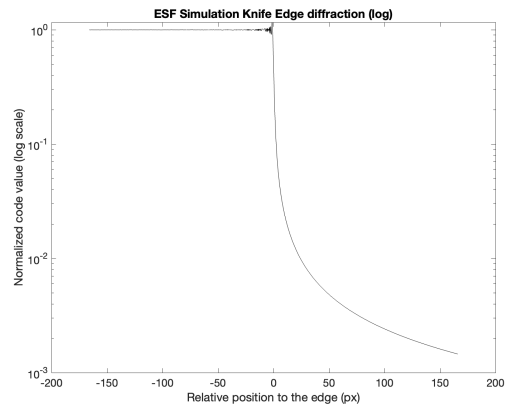
- Harald Brendel, Sean Cooper, *ARRI LogC4 Logarithmic Color Space Specification*, May 2023
- ARRI, *ALEXA 35 Software Update Package 1.2 User Manual*, July 2023

A - Annexes

Annexe 1

Tentative de MTF avec une lame de rasoir directement contre un film noir et blanc.
L'effet de diffraction est présent et invalide donc la mesure.

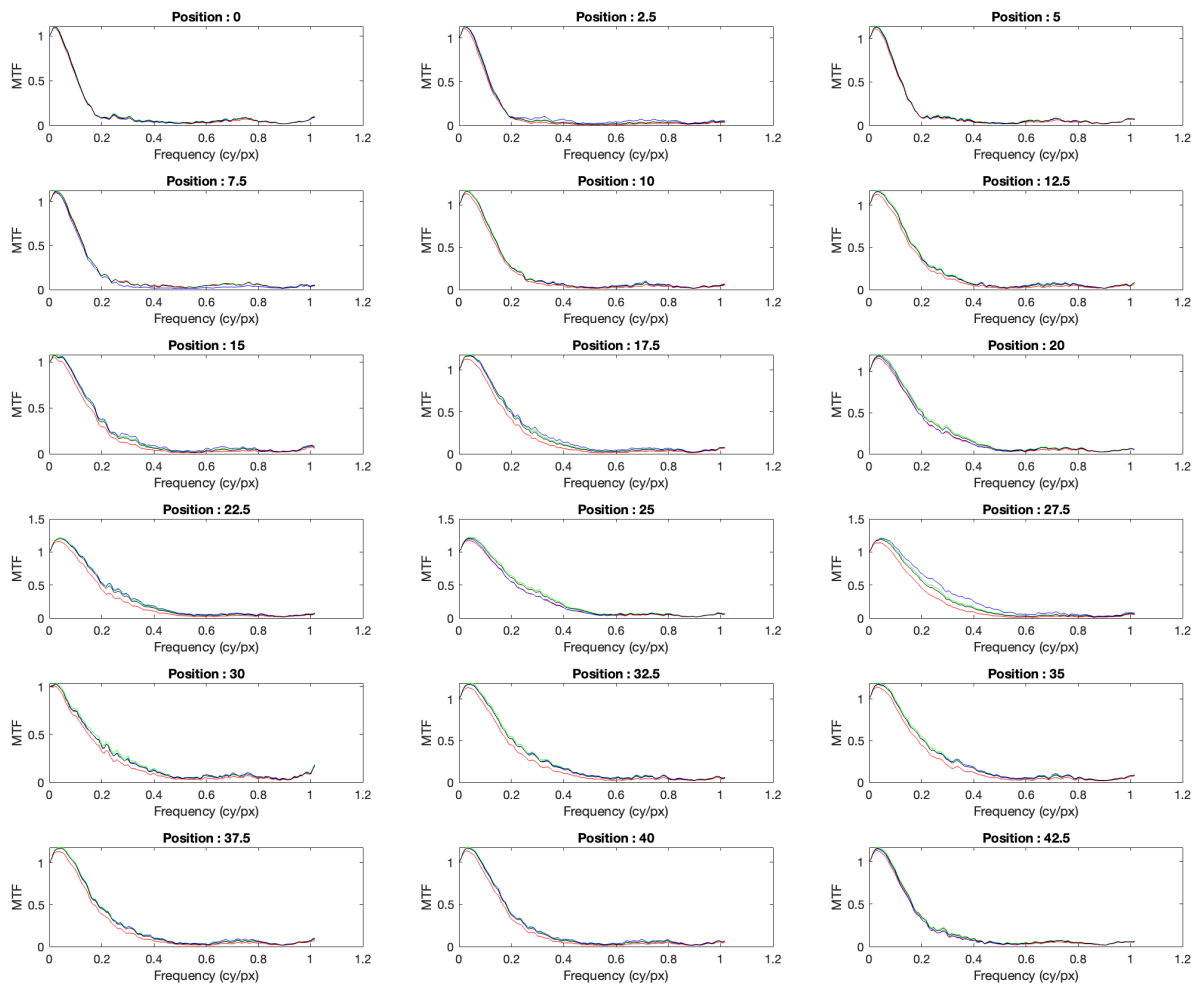




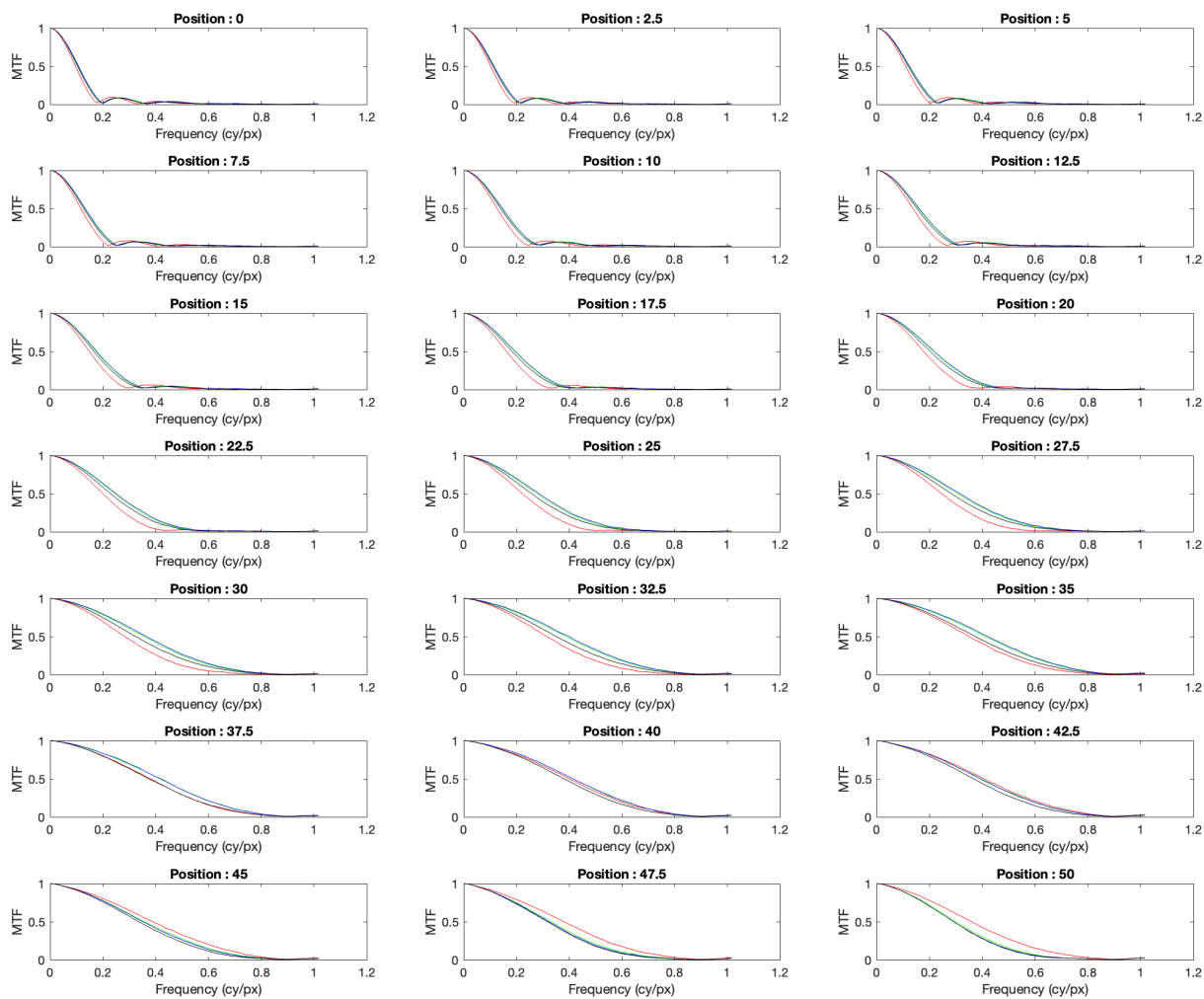
Annexe 2

Mesures MTF selon la position de l'appareil par rapport à la charte. Meilleure évaluation de la distance de mise au point.

Film

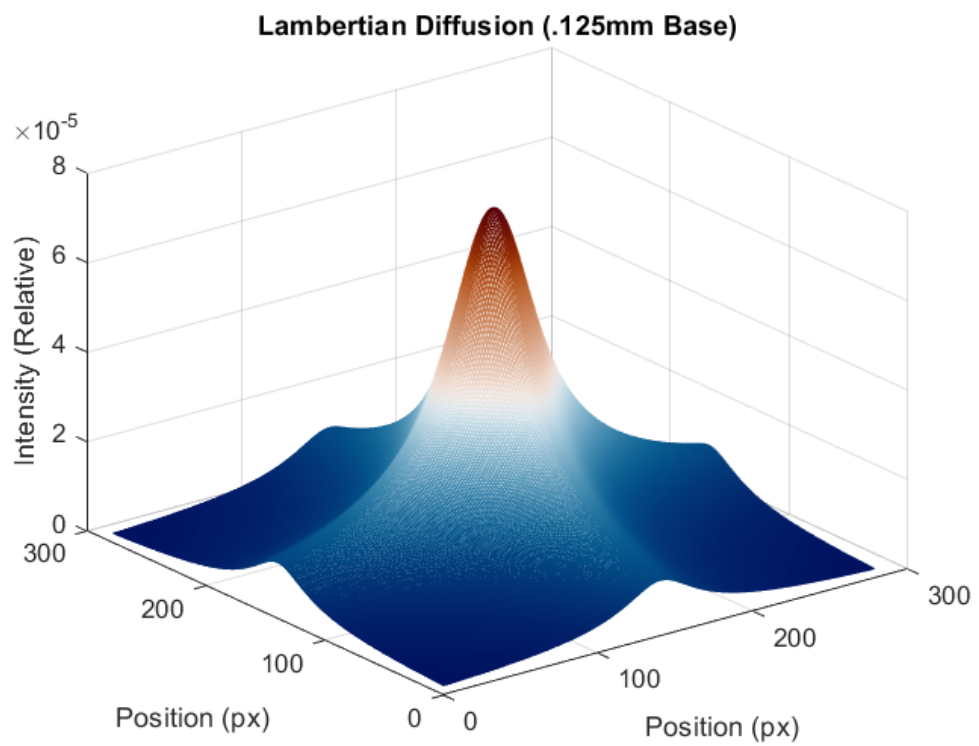
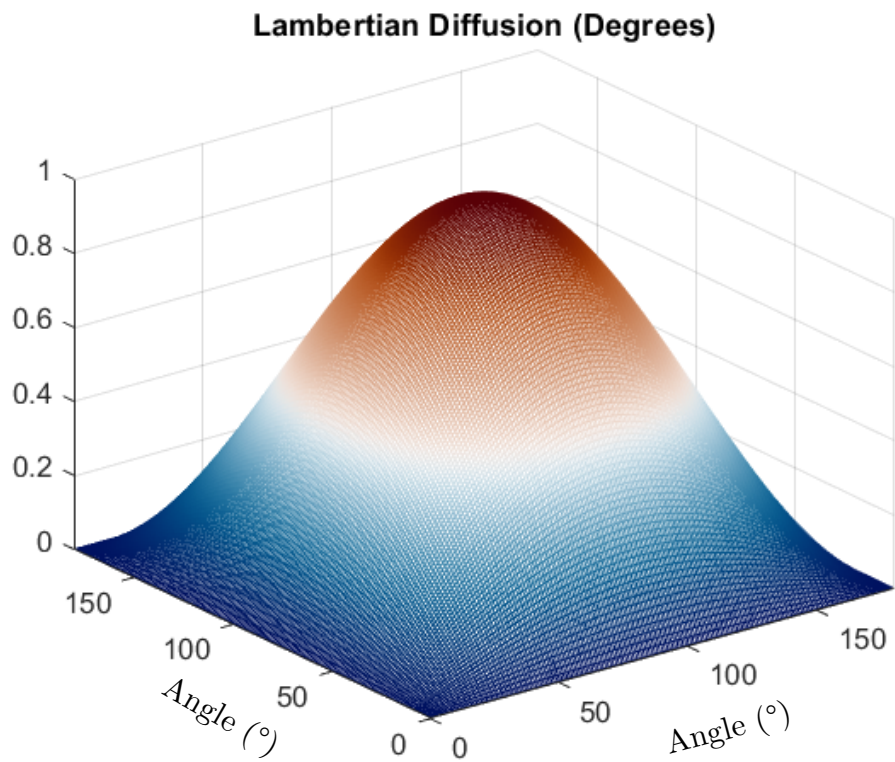


Digital



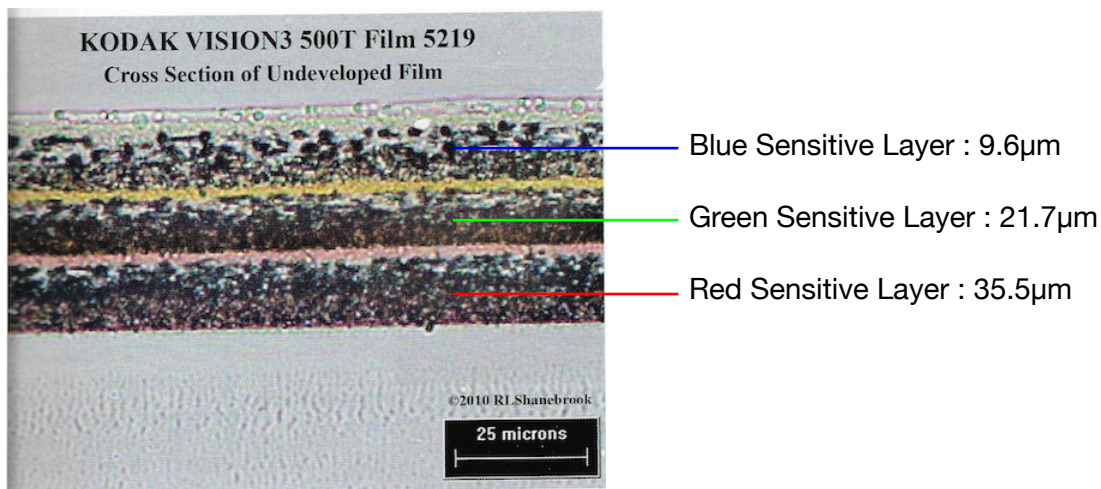
Annexe 3

Tentatives de modélisation de la remjet avec un filtre lambertien.



Annexe 4

Kodak 500T non développée, couches au microscope. 2010 RL ShaneBrook



Annexe 5

Détermination de la variance du bruit directeur basée sur la variance de la somme des bruits non corrélés.

$$\text{Var}(R_d) = \frac{a^2(\text{Var}G_{input} - c^2\text{Var}B_{input}) + b^2(\text{Var}B_{input} - c^2\text{Var}G_{input}) + (c^4 - 1)\text{Var}R_{input}}{a^4 - 2(abc)^2 + b^4 + c^4 - 1}$$

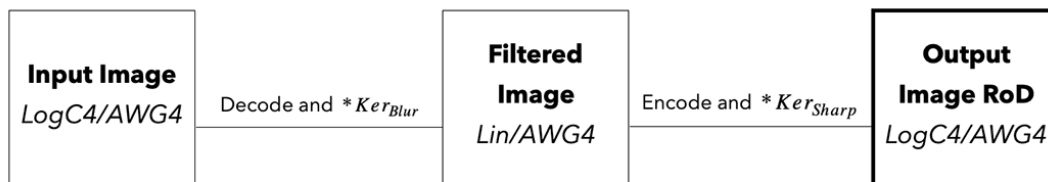
$$\text{Var}(G_d) = \frac{a^2(\text{Var}R_{input} - b^2\text{Var}B_{input}) + b^4\text{Var}G_{input} - (bc)^2\text{Var}R_{input} + c^2\text{Var}B_{input} - \text{Var}G_{input}}{a^4 - 2(abc)^2 + b^4 + c^4 - 1}$$

$$\text{Var}(B_d) = \frac{a^4\text{Var}B_{input} + b^2(\text{Var}R_{input} - a^2\text{Var}G_{input}) - (ac)^2\text{Var}R_{input} + c^2\text{Var}G_{input} - \text{Var}B_{input}}{a^4 - 2(abc)^2 + b^4 + c^4 - 1}$$

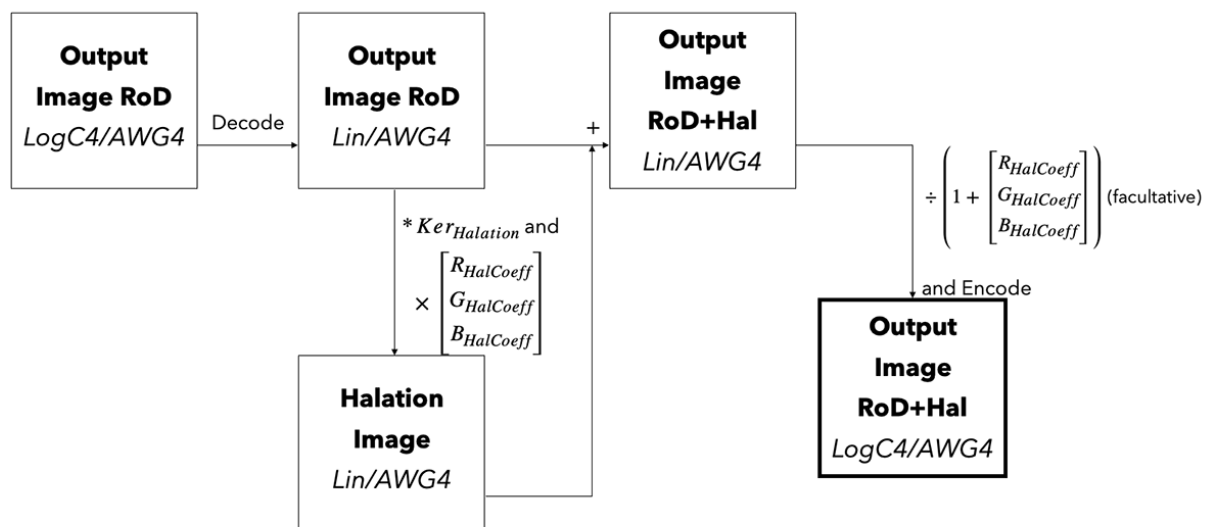
Annexe 6

Présentation du pipeline de traitement, de l'entrée LogC4 à la sortie traitée LogC4.

Rendition of Detail



Halation



Grain

