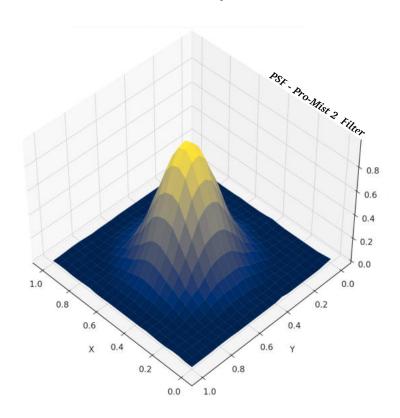
ENS LOUIS LUMIÈRE

La Cité du Cinéma – 20, rue Ampère BP 12 – 93213 La Plaine Saint-Denis Tel.0184670001 www.ens-louis-lumiere.fr

> Mémoire de master Spécialité cinéma, promotion 2025 Soutenance de juin 2025



Simulation Numérique de Diffusion Optique

Dorian Maigrot

Ce mémoire est accompagné de la partie pratique intitulée : Maman ne m'avait rien dit.

Direction interne:

Lucile Domenach, enseignante à l'ENS Louis-Lumière

Direction externe:

Brice Barbier, DIT

Présidente du jury cinéma et coordinateur des mémoires:

Giusy Pisano et David Faroult

Remerciements

Je tiens à remercier Lucile Domenach, ma directrice de mémoire interne, pour ses nombreux retours et ses conseils précieux tout au long de ce travail.

Un grand merci à Clément Montmea, assistant au laboratoire de sensitométrie, pour son expertise, ses conseils avisés, ses idées riches et les nombreuses ressources partagées.

Merci également à Brice Barbier, DIT et directeur externe de ce mémoire, pour ses nombreux conseils, son regard professionnel et ses idées, qui ont accompagné ce projet tout au long de l'année.

Je remercie Thomas Eberschveiller pour son aide précieuse, aussi bien lors de ses cours sur les workflows, que durant mon stage chez MPC ainsi que pour son aide lors de la réalisation de la partie pratique de mon mémoire.

Je remercie chaleureusement toute l'équipe de La Chapelle (Paul Morin, Martin Roux et Olivier Patron) pour leur soutien technique et leur disponibilité.

Merci à Arthur Paux pour notre entretien, ainsi qu'à Hazem Berrabah pour ses nombreux conseils.

Merci à Pierre Cottereau et Sébastien Mingam pour le temps qu'ils m'ont accordé et pour leurs précieux conseils.

Merci également à toute l'équipe de Transpacam pour leur présence constante et leur soutien technique.

Un grand merci à ma super promotion pour ces trois années partagées et à Vianne pour notre projet de fiction en deuxième année ainsi que notre collaboration sur la partie pratique du mémoire.

Enfin, un immense merci à mes parents, à ma sœur et à Louise pour leur soutien indéfectible et leurs relectures attentives.

Résumé

Les filtres de diffusion optique sont depuis longtemps des outils techniques essentiels pour les chef·fe·s opérateur·rice·s au cinéma, leur permettant de modifier l'apparence de l'image. Placés devant l'objectif, ces plaques de verre diffusent la lumière, adoucissent les détails et créent des halos autour des hautes lumières. Ce mémoire explore les possibilités de simulation numérique de ces effets, en s'appuyant d'abord sur les outils mathématiques issus de l'optique ondulatoire appliqués au traitement d'image. Dans un second temps, il s'intéresse aux caractéristiques physiques des filtres de diffusion optique, afin de déterminer quelles données doivent être acquises pour une reproduction fidèle de leurs effets. Ces données serviront ensuite de base à la conception d'une émulation numérique aussi réaliste que possible. Enfin, ce travail examine l'intégration de cette simulation dans un workflow professionnel de traitement vidéo en temps réel, en évaluant ses contraintes techniques, ses avantages, ainsi que sa pertinence en production et en post-production.

Mots-clées

Filtre - Diffusion - Optique - Émulation - Texture - Workflow - Étalonnage - DIT - Filtrage - Python - TouchDesigner

Abstract

Optical diffusion filters have been essential technical tools for cinematographers for a long time, allowing them to change the look of the image. Placed in front of the lens, these glass filters diffuse light, soften details, and create glows around highlights. This thesis explores the possibilities of digitally simulations of these effects, first relying on mathematical tools from wave optics applied to image processing. Secondly, it looks at the physical properties of optical diffusion filters to figure out what data needs to be collected to accurately reproduce their effects. This data will then serve as the foundation for designing a digital emulation that is as realistic as possible. Finally, this work looks at how to integrate this simulation into a real-time video processing workflow, evaluating its technical constraints, benefits, and relevance in production and post-production.

Keywords

Filter - Scattering - Optics - Emulation - Texture - Workflow - Calibration - DIT - Filtering - Python - TouchDesigner

Sommaire

I	Remerciements	2
I	Résumé	3
A	Abstract	4
5	Sommaire	5
I	Introduction	7
I - D	e l'optique ondulatoire aux aspects mathématiques utilisés	8
I	1.1. La diffraction comme outil vers l'optique de Fourier	8
	I.1.1 Diffraction de Fraunhofer	8
	I.1.2. Modification de phase de la lumière	10
I	1.2. Théorie de Fourier appliquée à l'image	12
	I.2.1. Théorie de Fourier : décomposition d'un signal en une somme de signaux sinusoïdaux	12
	I.2.2. Application 1 : TF d'un objet 2D - diffraction par une fente dans les conditions de Fraunhofer	13
	I.2.3. Application 2 : TF d'une image 2D – l'image numérique et son traitement	17
I	1.3. La convolution pour interpréter la formation d'image à travers	
1	un système optique	23
	I.3.1. Fonction de transfert par modulation (FTM)	23
	I.3.2. Point Spread Function (PSF)	25
	I.3.3. La convolution et l'intérêt de la TF	28
II - F	Filtres de diffusion réels	37
I	II.1. La physique des filtres de diffusion	37

II.1.1. Interactions fondamentales	37
II.1.2. Fonctionnement des filtres de diffusion	41
II.2. Étude quantitative de la diffusion des filtres optiques	43
II.2.1. Essais et mise en place d'un protocole	43
II.2.2. Acquisitions des PSF des filtres de diffusion	59
III - Émulation Numérique	63
III.1 Fonctionnement du code	63
III.2. Observation des résultats	69
IV - Intégration dans un Workflow	
IV.1. Simulation de diffusion en direct	74
IV.1.1 Gestion du flux vidéo	77
IV.1.2 Diffusion via TOP Bloom	81
IV.1.3 Outils de diffusion pour un flux vidéo	84
IV.2. État des lieux de la simulation de texture dans un workflow actuel	90
IV.2.1 En production	90
IV.2.2 En post-production	93
IV.2.3 Enjeux annexes	96
Conclusion et perspectives	100
Bibliographie	102
Liste des figures	106
Annexes	108

Introduction

Depuis longtemps, les filtres de diffusion optique occupent une place essentielle dans la panoplie des outils des chef·fe·s opérateur·rice·s. Utilisés pour adoucir les détails, créer des halos autour des hautes lumières ou encore modifier subtilement la texture de l'image, ces filtres optiques constituent un élément important des techniques de création d'image. Pourtant, alors que la simulation numérique de la pellicule (grain, colorimétrie, halation) est souvent utilisée dans les workflows de post-production actuels, la diffusion optique reste majoritairement assurée par des procédés physiques encore omniprésents sur les tournages. Cependant, plusieurs extensions de logiciels d'étalonnage ont vu le jour et proposent à leur tour de simuler ces phénomènes de diffusion optique.

Ce mémoire propose donc une réflexion sur les possibilités offertes par ces outils. Peut-on simuler de manière réaliste la diffusion optique à partir d'une modélisation de ses phénomènes physiques ? Pour répondre à cette question, il est nécessaire de comprendre les liens entre certains concepts de l'optique ondulatoire, comme la diffraction ou la transformée de Fourier, et les outils mathématiques impliqués dans le traitement d'image numérique.

Les recherches menées dans le cadre de ce mémoire s'articulent d'abord autour d'une approche théorique, fondée sur les lois physiques régissant la lumière et son interaction avec les matériaux diffusants. Elles se prolongent ensuite par une mise en pratique, à travers le développement d'un protocole d'analyse des filtres optiques et la création d'un programme de simulation basé sur les données mesurées. Ce processus a pour finalité d'intégrer cette émulation dans un flux vidéo en direct, afin de permettre la prévisualisation des effets de diffusion sur les moniteurs lors du tournage. Cette réflexion aboutira ainsi à un questionnement de la pertinence de ce type de traitement d'image, que ce soit dans le cadre d'un étalonnage « on-set » ou en post-production.

I - De l'optique ondulatoire aux aspects mathématiques utilisés

Cette partie a pour objectif d'explorer les liens entre les phénomènes d'optique ondulatoire et les outils mathématiques qui seront employés dans la simulation de la diffusion. Nous y aborderons le phénomène de diffraction, la théorie de Fourier ainsi que la notion de convolution, afin d'établir un socle théorique solide avant de développer un protocole d'analyse et de programmer une émulation des filtres de diffusion.

I.1. La diffraction comme outil vers l'optique de Fourier

I.1.1. - Diffraction de Fraunhofer

En prenant l'exemple d'une source lumineuse monochromatique éclairant une fente, on peut observer, en plaçant un écran derrière, des figures de diffraction. Les zones lumineuses correspondent à des interférences constructives (ondes en phase), tandis que les zones sombres correspondent à des interférences destructives (ondes en opposition de phase). La figure de diffraction obtenue évolue en fonction de la distance entre la fente et l'écran. Lorsque la distance à l'écran devient importante, la figure de diffraction se fige. On quitte le champ proche pour le champ lointain.

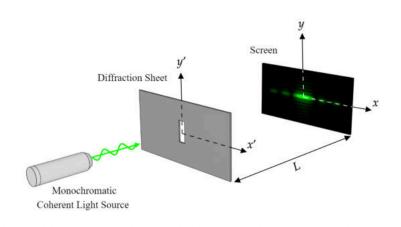


Figure 1 - Figure de diffraction par une fente.

Dans le cadre de l'image cinématographique, le phénomène de diffraction dans les conditions de Fraunhofer est prépondérant. Il permet par exemple l'interprétation de la limite de résolution d'un système optique. Et plus généralement, dans ces conditions, l'optique de Fourier offre les ponts entre optique et aspects mathématiques pour interpréter la formation d'une image à travers un système optique. Pour se placer dans ces conditions, on place l'objet diffractant à l'infini donc en le mettant dans le plan focal objet d'une lentille convergente (L1). On le considère éclairé par une onde plane (i.e. source éloignée de l'objet). Par analogie avec la fente éclairée par le laser et située à l'infini par rapport à l'écran, la TF de l'objet diffractant se situe alors dans le plan focal image de la lentille L1. On l'appelle alors le plan de Fourier. L'image de l'objet diffractant se forme à l'infini : on peut la ramener sur un écran que l'on place dans le plan focal image d'une deuxième lentille convergente (L2).

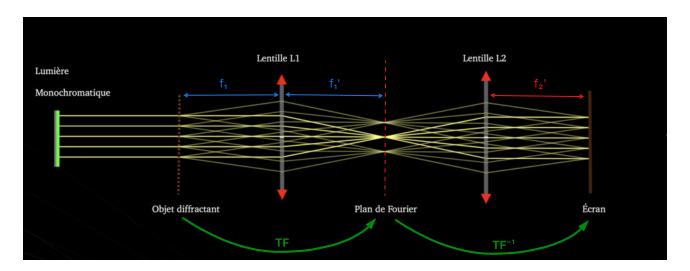


Figure 2 - Montage optique de la diffraction de Fraunhofer.

I.1.2. Modification de phase de la lumière

Pour aller plus loin dans la compréhension de la transformée de Fourier optique il est intéressant de comprendre comment notre montage influe sur la phase de la lumière. On la considère ici comme étant monchromatique, en se souvenant que l'onde lumineuse est la somme d'une infinité d'ondes monochromatiques. Dans notre montage objet diffractant/ lentille, on peut observer dans un premier temps que lorsqu'elle traverse l'objet, la lumière est modulée en fonction de l'absorption de l'objet (plus l'absorption est grande, plus l'intensité diminue) et modifie sa phase (en changeant la vitesse de l'onde sans l'absorber). On parle alors de transmittance¹ réelle si l'objet ne fait qu'absorber la lumière, et de transmittance complexe si l'objet induit un déphasage. La transmittance complexe liée à l'objet combine des informations d'amplitude (ce qui passe et ce qui est bloqué) et de phase (comment l'onde est retardée). On parle alors de transmittance complexe d'un objet puisqu'elle peut être exprimée comme une fonction complexe dont le module est l'amplitude de transmission et l'argument sa phase. L'objet se comporte finalement comme un filtre spatial qui code dans l'onde des informations propres à celui-ci. Dans un second temps, en s'intéressant au fonctionnement d'une lentille simple convergente, on s'aperçoit qu'elle induit aussi une modification de phase lorsqu'elle est traversée par la lumière. Plus le point d'incidence est éloigné du centre optique, moins l'onde traversera de verre et donc plus vite elle ressort de la lentille. Elle est en avance par rapport à celle générée par des ondes dont le point d'incidence était plus proche de l'axe optique. L'onde parfaitement plane à l'origine (dont les fronts d'onde sont des plans parallèles et perpendiculaires à la direction de propagation) devient en sortie de la lentille une onde sphérique convergente, permettant la caractéristique principale de la lentille : faire converger la lumière en un point.

¹ <u>Transmitance</u> = coefficient de transmission qui dépend de la longueur d'onde de l'onde incidente et définit comme le rapport des intensités incidente et transmise.

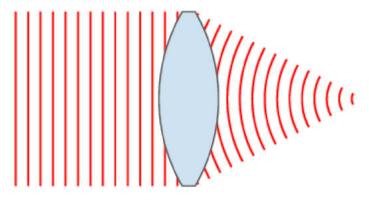


Figure 3 - Changement du front d'onde au travers d'une lentille convergente.

Alors, lorsque la lumière provenant des sources secondaires de l'objet diffractant traverse la lentille, elle diffuse des ondes sphériques depuis la lentille en fonction de la distance au centre optique. En sortie de celle-ci, les ondes vont s'additionner ou s'annuler sur le plan focal de la lentille, créant des zones de hautes intensités ou des zones sombres : ce sont des interférences. Ces interférences contiennent donc les informations d'amplitude et de phase de l'objet diffractant. Comme nous l'avons vu ces interférences représentent le spectre spatial de l'objet et permettent de visualiser les fréquences spatiales présentes dans l'objet et avec leur intensité. La lentille agit comme un transformateur physique entre espace objet et espace fréquentiel. L'intensité de ces zones est alors fonction de la transformée de Fourier.

I.2. Théorie de Fourier appliquée à l'image

I.2.1. Théorie de Fourier : décomposition d'un signal en une somme de signaux sinusoïdaux

Un signal, qu'il soit temporel ou spatial, peut être vu comme la superposition d'ondes périodiques de différentes fréquences. La fréquence est définie comme l'inverse de cette période : plus un motif est resserré, plus sa fréquence est élevée. Les basses fréquences traduisent les variations lentes du signal, et les hautes fréquences correspondent aux variations rapides. Ainsi, n'importe quel objet en deux dimensions (que ce soit une image ou un objet) s'interprète comme un signal lumineux à 2D qui peut se représenter dans le domaine spatial (ce qu'on observe directement) ou dans le domaine fréquentiel. Le passage de l'un à l'autre des domaines se fait par une opération mathématique appelée la transformée de Fourier (TF). Elle permet de décomposer un signal complexe en une somme d'ondes sinusoïdales simples, chacune caractérisée par une fréquence particulière.

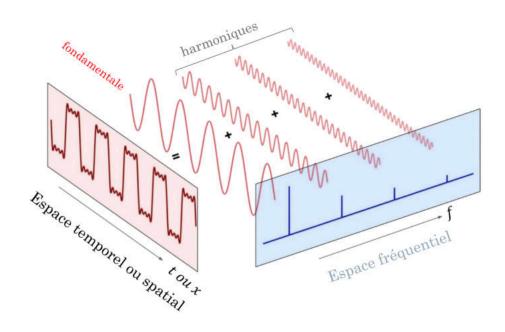


Figure 4 - Représentation du signal dans le domaine spatial et fréquentiel.

I.2.2. Application 1 : TF d'un objet 2D - diffraction par une fente dans les conditions de Fraunhofer

On a l'habitude de rencontrer la transformée de Fourier en traitement du signal, lors de la décomposition d'un signal complexe (comme un son) en une somme de composantes sinusoïdales de différentes fréquences. Un objet peut être vu comme un assemblage de motifs périodiques, chacun ayant une fréquence spatiale donnée et une intensité associée. La TF permet de visualiser la composition fréquentielle de l'objet. On retrouve dans le plan de Fourier le spectre de l'objet qui prend la forme de points plus ou moins lumineux répartis symétriquement autour de l'axe optique. Les points au plus proche du centre constituent les basses fréquences de l'objet (les aplats), alors que les points plus éloignés constituent les hautes fréquences de l'objet (les détails). Cette répartition des points lumineux est le résultat de la transformée de Fourier, qui permet le passage d'une description spatiale du signal (ici signal 2D car image d'un plan-objet) à une information fréquentielle. Un exemple est celui de la diffraction par une fente, comme dans la figure 5. La lumière verte monochromatique traverse une fente étroite et haute. La variation de

transmission est très brusque le long de l'axe horizontal x' — on passe rapidement de l'opacité à la transparence aux bords de la fente. Cette discontinuité produit une large gamme de hautes fréquences spatiales selon l'axe x, qui se traduisent par un spectre étalé horizontalement dans le plan de Fourier. À l'inverse, la variation est faible dans le sens vertical y', ce qui donne un spectre resserré dans cette direction. Ainsi, le motif de diffraction observé montre une forte concentration d'intensité lumineuse au centre, avec des lobes secondaires qui s'étendent principalement à l'horizontale : ce sont les hautes fréquences nécessaires pour décrire la discontinuité horizontale de la fente.

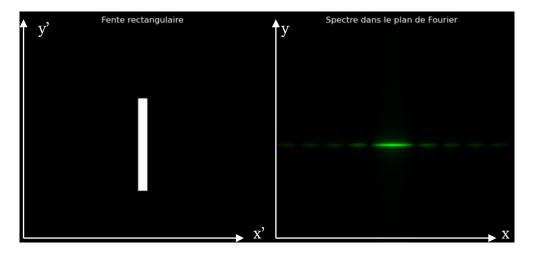


Figure 5 - Transformée de Fourier d'une fente.

Filtrage Spatial

Il devient alors tout à fait possible d'intervenir dans le plan de Fourier pour réduire l'intensité des fréquences spatiales. Ces modifications dans le domaine fréquentiel peuvent prendre la forme de cercles obstruants autour du nuage de points et supprimant les hautes fréquences spatiales, ou au contraire uniquement au centre, supprimant les basses fréquences spatiales. L'utilisation d'un diaphragme centré sur l'axe optique et placé dans le plan de Fourier revient à bloquer les hautes fréquences et donc réduire les détails de l'image, floutant ainsi celle-ci. On sort alors à nouveau du domaine fréquentiel au travers d'une transformée inverse de Fourier pour obtenir à nouveau notre image.

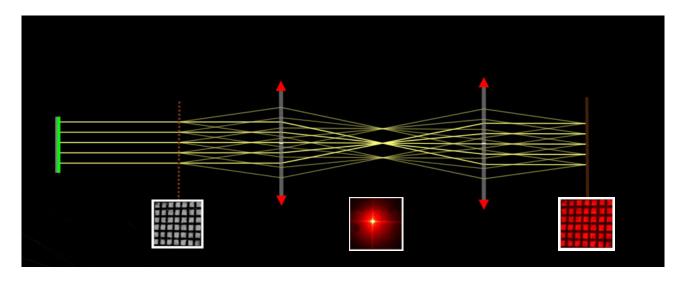


Figure 6 - Image obtenue au travers du montage (sans filtrage).

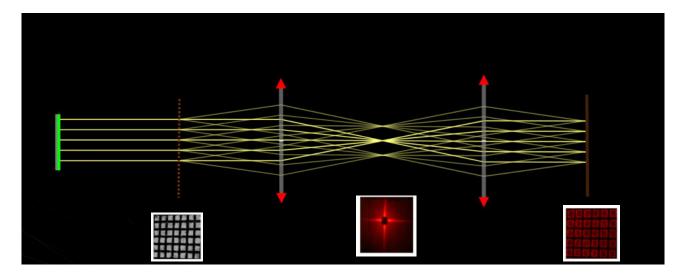


Figure 6bis- Image obtenue au travers du montage (avec filtrage du centre, mise en avant des contours).

Expérience d'Abbe

Cette expérience concrète nous montre qu'un objet périodique comme une grille peut être filtré directionnellement. Cet objet aux lignes verticales et horizontales produit dans le plan de Fourier un spectre constitué de pics lumineux dont l'intensité et la position dépendent des fréquences spatiales de la grille. En plaçant dans le plan de Fourier une fente verticale ou horizontale, on obstrue le spectre. En plaçant à nouveau une lentille convergente de manière à ce que son foyer-objet soit sur le plan de Fourier, on obtient une image définitive filtrée qui ne laisse apparaître que les parties horizontales ou verticales de la grille en fonction de l'inclinaison de la fente. Cet exemple de filtrage spatial peut avoir de multitude d'usages comme pour le détramage. Ce type de filtrage via la TF trouve son équivalent dans le traitement d'images numériques.²

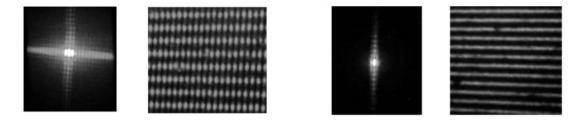


Figure 7 - Filtrage par une fente dans le domaine de Fourier.

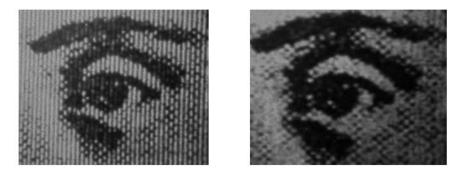


Figure 7bis - Détramage d'une image.

² Figure 7 et 7bis: VAILLS, Y. Optique de Fourier et formation des images [Cours]. CNRS - CEMHTI. https://www.cemhti.cnrs-orleans.fr/images/Personnels/42 D Cours Optique de Fourier et formation des images.pdf

I.2.3. Application 2 : TF d'une image 2D – l'image numérique et son traitement

Conversion Analogique en Numérique

Pour comprendre le fonctionnement de la TF sur une image numérique, nous devons tout d'abord définir ce qu'est une image numérique. En sortie d'un capteur, les informations sont un signal continu caractérisé par une amplitude en fonction du temps. La première étape de sa numérisation consiste à l'échantillonner, c'est à dire venir prélever à des intervalles de temps réguliers qui définissent la fréquence d'échantillonnage. La deuxième étape consiste à quantifier ces valeurs en convertissant les échantillons en nombre binaire. Cette étape joue un rôle fondamental dans le poids des fichiers générés et dépend de la profondeur d'encodage du signal. Un codage sur n bits donnera 2ⁿ valeurs possibles. Ces valeurs sont ensuite structurées dans le flux numérique en fonction du type de codage choisi et peuvent être enregistrées ou transmises. La conversion analogique en numérique permet alors de passer d'un signal continu à un signal discontinue binaire.

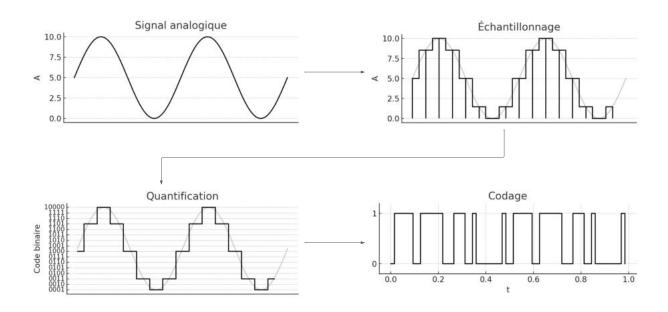


Figure 8 - Conversion Analogique vers Numérique.

Matrice et signal discret bi-dimensionnel

Avant de nous intéresser au signal complet, il est pertinent d'étudier indépendamment les images qui le constituent. Une des représentations de l'image numérique qui va nous intéresser est la matrice puisqu'elle représente une tableau de nombres (array). Les cases d'une matrice sont repérées par un couple de nombre (n,m) où n est le numéro de ligne et m, le numéro de colonne dans laquelle elle se trouve. Chaque case est associée à un pixel et la valeur numérique contenue dans la case donne le niveau de gris du pixel. Sous Python, avec la bibliothèque Numpy, "array" permet de manipuler des valeurs numériques comme si elles étaient dans une matrice. Par exemple, pour créer une image 5x5 en niveau de gris en 8bits, on réalise un tableau contenant les valeurs en intensité de l'image souhaitée. On peut alors noter notre image comme un signal discret (discontinu) et bi-dimentionnel (axe vertical et horizontal) sous la forme f[m,n]. La représentation d'une image en couleur prend alors la forme d'un tableau tri-dimensionnel contenant trois matrices 2D pour chaque canal R, V et B. Cette structure permet de représenter chaque pixel par un triplet de valeurs sous la forme $f[m,n] = [R_{mn}, G_{mn}, B_{mn}]$.

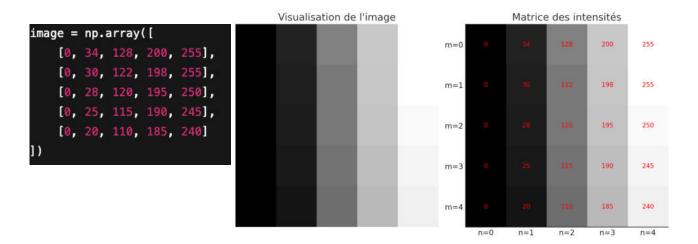


Figure 9 - Image sous la forme de matrice (array).

Multiplication scalaire et encodage gamma

En tant que tableau numérique, une image peut être manipulée par des opérations mathématiques. Une des fonction de base est la multiplication de matrice par un scalaire, c'est-à-dire multiplier chaque pixel par un même facteur. Cette opération permet par exemple d'augmenter ou de réduire l'intensité lumineuse globale d'une image. Lorsqu'on travaille avec une image RGB, cette opération est appliquée indépendamment à chaque canal de couleur (R, V, B) sur toute la matrice tridimensionnelle. Ces manipulations simples sont toutefois soumises à une contrainte importante : la non-linéarité de l'encodage des images. Dans la majorité des cas (formats JPEG, PNG, vidéos sRGB...), les valeurs stockées dans l'image ne représentent pas directement la lumière réelle, mais une valeurs encodée selon une courbe gamma. Les valeurs de la matrice ne sont pas proportionnelles à la luminance physique : une valeur de pixel à 128 n'émet pas "la moitié de la lumière" par rapport à 255. La correction gamma est une transformation non linéaire sous la forme:

$$I_{encode} = (I_{lineaire})^{\frac{1}{\gamma}}$$

avec par exemple $y\approx 2.2$ dans l'espace sRGB ou $y\approx 2.2$ pour la ITU 1886 (Rec.709)³.

Historiquement, la notion de gamma provient du fonctionnement des anciens écrans CRT (Cathode Ray Tube). Ces écrans ne répondaient pas linéairement à la tension du signal vidéo : la luminance réelle qu'ils produisaient était proportionnelle à la tension du signal élevée à une puissance gamma, généralement proche de 2.2. Cette non-linéarité physique a été conservée dans les standards numériques modernes (comme sRGB ou Rec. 709) afin de maintenir la compatibilité avec les appareils de diffusion existants. Cependant, lorsqu'on souhaite appliquer des opérations de traitement d'image comme la convolution, le floutage

³ ITU-R BT.1886, Reference electro-optical transfer function for flat panel displays used in HDTV studio production, International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector (ITU-R), Geneva, 2011. https://www.itu.int/dms pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.1886-0-201103-I!!PDF-E.pdf

ou la combinaison de plusieurs images, il est important de travailler dans un espace linéaire. C'est dans cet espace que l'on effectuera le traitement de nos propres images.

Transformée de Fourier Discrète

La transformée de Fourier nous a permis de voir la représentation des fréquences spatiales d'un objet au travers d'une lentille. Mais c'est aussi un outil omniprésent dans le domaine du traitement du signal vidéo puisqu'il permet de modifier une image numérique dans le domaine fréquentiel. Une image peut alors être interprétée comme une combinaison de deux décompositions en signaux périodiques, orientées selon deux directions perpendiculaires l'une de l'autre. La transformée de Fourier 2D permet ainsi d'analyser une image non plus uniquement selon la position de ses pixels mais selon la manière dont ses motifs sont répartis dans l'image.

Ainsi mathématiquement, la transformée de Fourier associe à toute fonction intégrable définie sur $\mathbb R$ une autre fonction sur $\mathbb R$ appelée transformée de Fourier avec pour variable la fréquence. Comme nous l'avons vue dans le domaine numérique, nous travaillons sur un signal discret bidimentionnel. Pour permettre la transformée de Fourier de ce signal nous utilisons la Transformée de Fourier Discrète 2D qui associe à une image I une image complexe \hat{I} de mêmes dimensions (H x W). Sa formule est:

$$\hat{I}[k_x, k_y] = \frac{1}{HW} \sum_{x=0}^{H-1} \sum_{y=0}^{W-1} I[x, y] \cdot e^{-2i\pi \left(\frac{x \cdot k_x}{H} + \frac{y \cdot k_y}{W}\right)}$$

Avec I[x, y] l'intensité du pixel à la position x et y.

Et k_x , k_y les nombres entiers définissant les fréquences spatiales : $f_x = \frac{k_x}{H}$ et $f_y = \frac{k_y}{W}$.

20 sur 118

Pour employer cette fonction dans Python, on utilise la fonction fft2 et ifft2 de la bibliothèque Scipy qui correspondent à la transformée de Fourier rapide (FFT) et transformée de Fourier rapide inverse (iFFT). Le résultat de la transformée de Fourier d'une image nous donne une représentation de l'amplitude de chaque fréquence spatiale. Prenons l'exemple d'une image d'un carré et observons son spectre via un fft2. La transformée de Fourier du carré forme une matrice à l'intensité par fréquence qui varie. La représentation qui résulte de fft n'est pas centrée à cause d'artéfacts mathématiques de calculs, nous utilisons alors fftshift pour la remettre au centre. On observe donc la représentation de l'objet du carré dans le domaine de Fourier cohérent avec ce que l'on a déjà pu observer en optique de Fourier.

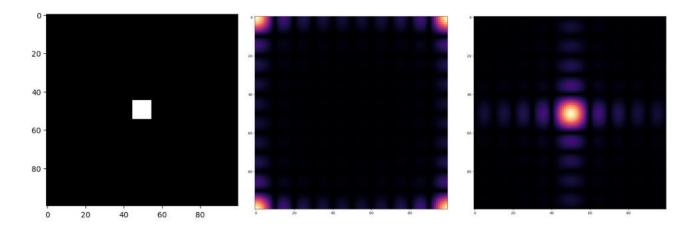


Figure 10 - Filtrage d'une image dans le domaine de Fourier.

Filtrage numérique dans le domaine de Fourier

Comme pour le filtrage spatial en optique, il est tout à fait possible d'intervenir sur une image numérique en supprimant certaines fréquences de son spectre. La *figure 11* illustre le rendu obtenu après la suppression d'un groupe précis de fréquences spatiales.

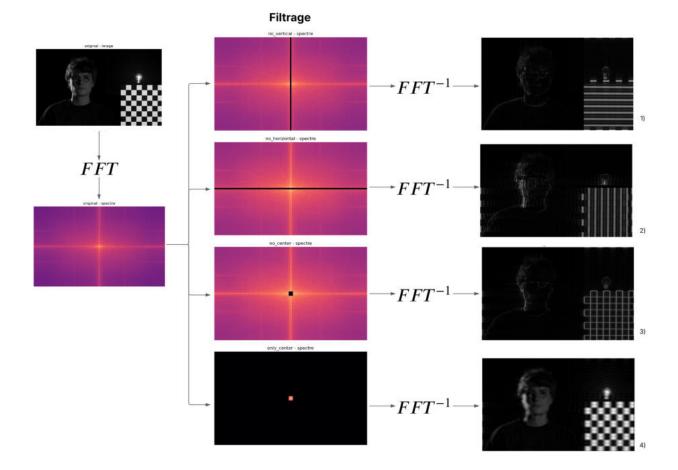


Figure 11 - Filtrage numérique dans le domaine de Fourier.

- 1. Filtrage vertical : de façon symétrique, on élimine les fréquences présentes sur l'axe vertical, ce qui atténue les structures horizontales de l'image.
- 2. Filtrage horizontal : on supprime les fréquences alignées sur l'axe horizontal du spectre. Cela atténue fortement les motifs verticaux de l'image. Les lignes verticales deviennent floues, voire disparaissent.
- **3.** Filtrage passe-haut : en supprimant le centre du spectre, seules les hautes fréquences sont conservées. On obtient alors une image qui ne contient principalement que les contours et les détails fins.
- **4.** Filtrage passe-bas : en ne conservant que les fréquences proches du centre (basses fréquences), on supprime les détails fins. L'image devient floue, avec une dominante de formes douces et peu contrastées.

I.3. La convolution pour interpréter la formation d'image à travers un système optique

I.3.1. Fonction de transfert par modulation (FTM)

La FTM

Pour permettre d'appréhender et de quantifier la perte de rendu des détails dans un système optique on utilise la fonction de transfert de modulation (Modulation Transfer Function, MTF en anglais). Le contraste est défini comme le rapport entre les zones les plus sombres et les plus lumineuses d'un motif périodique. La FTM décrit comment un système optique modifie (ou module) le contraste des détails présents dans une scène lorsqu'ils sont transmis à l'image finale. Dans un monde idéal, une optique parfaite transmettrait 100 % du contraste de la scène, quelle que soit la finesse des détails. En réalité, tout système optique altère partiellement l'information lumineuse qu'il transmet, en particulier pour les hautes fréquences spatiales, c'est-à-dire les détails fins. La FTM permet de mesurer précisément cette dégradation. Elle s'appuie sur la perte de contraste entre l'objet d'origine et son image formée par le système optique. Plus les motifs sont fins (donc à haute fréquence spatiale), plus leur contraste diminue après passage à travers l'optique.

Une méthode simple et efficace pour obtenir la FTM consiste à observer une mire de test composée d'une alternance de bandes noires et blanches, dont la fréquence spatiale (le nombre de motifs par millimètre) augmente progressivement sur l'axe horizontal. En observant la dégradation progressive du contraste à mesure que les bandes se resserrent, on peut évaluer le niveau de détail que l'optique est capable de restituer fidèlement. Chaque système optique possède ainsi sa propre courbe FTM, qui représente, en ordonnée, le contraste normalisé (de 1 à 0), en fonction de la fréquence spatiale en abscisse (exprimée

en cycles par millimètre, par exemple). Plus la fréquence augmente, plus le contraste diminue. C'est pourquoi la courbe FTM a généralement une forme décroissante. Elle part d'un contraste élevé pour les faibles fréquences spatiales et tend vers zéro lorsque les détails deviennent trop fins pour être transmis efficacement par le système.

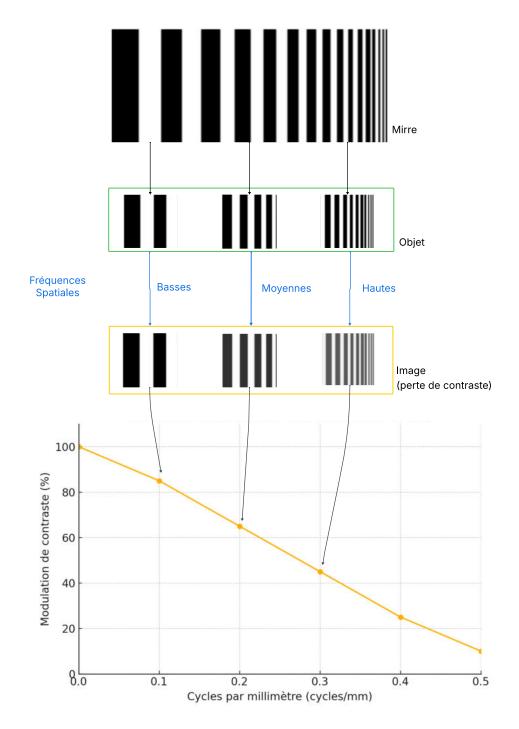


Figure 12 - Courbe FTM: Baisse du contraste avec l'augmentation de la fréquence spatiale.

I.3.2. Point Spread Function (PSF)

La fonction d'étalement d'un point (Point Spread Function) décrit comment un point objet est transformé en une tache étalée dans l'image par le système optique. Une source lumineuse ponctuelle idéale est représentée par la fonction de Dirac. Il s'agit d'une fonction qui a pour valeur infinie en 0 et une valeur nulle partout ailleurs. Elle représente un idéal d'impulsion à transmettre à l'optique pour observer son comportement. Lorsqu'un système optique réagit à une telle impulsion lumineuse, la distribution lumineuse obtenue dans le plan image correspond à la PSF. Cette fonction rend possible, nous le verrons par la suite, des manipulations par convolution d'une image pour modéliser la réponse d'un système optique à une scène lumineuse. La PSF est particulièrement utilisée dans le domaine scientifique comme l'astronomie ou la microscopie, où l'on peut déterminer cette fonction en observant des sources ponctuelles éloignées (comme une étoile). Cela permet de simuler le comportement d'un système optique grâce à une opération de convolution.

La PSF peut également être étendue en trois dimensions pour voir comment le point lumineux se répartit non seulement dans le plan image, mais aussi en profondeur. Cela se traduit par un nuage de points en trois dimensions que les concepteurs d'optiques cherchent à rendre aussi compact que possible afin de maximiser la résolution et la précision du système. Plus la PSF est étalée (c'est-à-dire plus la lumière d'un point source est dispersée dans l'image finale), plus la résolution du système diminue.

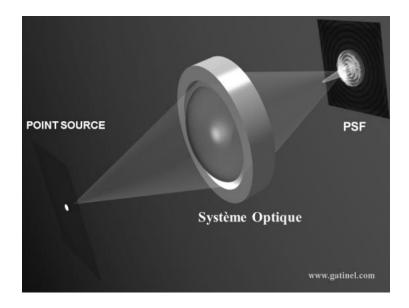


Figure 13 - schéma illustrant le principe de la PSF.

Source: Pr. Damien Gatinel (s.d), , disponible à l'adresse : https://www.gatinel.com/

La tâche d'Airy est un cas particulier de la PSF puisqu'elle est l'image d'un point au travers d'un système optique limité par la diffraction. En effet, la lumière diffractée par l'ouverture de l'objectif produit alors une figure caractéristique composée d'un disque central lumineux entouré d'anneaux concentriques d'intensité décroissante. Cette figure traduit donc la limite physique de résolution d'un système optique. L'angle d'étalement θ de cette tâche dépend de la longueur d'onde λ de la lumière et du diamètre D de l'ouverture, selon la relation :

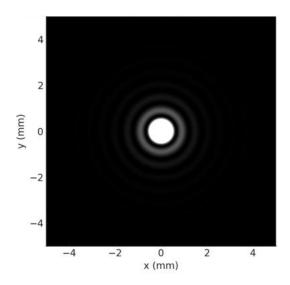
$$\theta \approx 1.22 \times \frac{\lambda}{D}$$

Mais lorsqu'on considère un objectif de focale f et d'ouverture N, la formule physique de l'angle devient :

$$\theta = 1.22 \times \lambda \times N$$

avec $N = \frac{1}{D}$ et D le diamètre de l'ouverture circulaire.

Plusieurs critères permettent une évaluation quantitative du pouvoir de résolution de l'objectif en fonction de la séparation entre deux taches d'Airy. Un des critères les plus utilisés est le critère de Rayleigh qui stipule que deux points doivent être espacés au minimum de deux fois le rayon de la tâche.



<u>Figure 14 - Tâche d'airy. Ajout coupe</u> avec D.

Finalement on peut ainsi interpréter la formation d'une image comme le résultat de la réponse du système optique à une infinité de points sources provenant de l'objet. Chaque point de l'objet émet une onde lumineuse, qui, après avoir traversé le système optique, donnera un point image modulée par la PSF. L'image finale est donc la somme des multiplications entre la PSF et chacun des points source objets. Mathématiquement, cette opération correspond à une convolution de l'objet avec la PSF du système.

I.3.3. La convolution et l'intérêt de la TF

Opération mathématique

La convolution est une opération fondamentale en optique comme en traitement du signal. On retrouve cette opération mathématique en traitement d'image et on la note *. Elle permet de transformer un signal ou une image en appliquant un filtre appelé noyau de convolution qui modifie localement les valeurs du signal. Cette opération est omniprésente dans les applications de floutage, de détection de contours, de netteté ou encore de filtrage fréquentiel. Mathématiquement, la convolution de deux fonctions continues f et g est définie par une intégrale. En faisant varier le parmamètre f lors de l'intégration, le noyau se déplace de manière f ce que la multiplication sous l'intégrale soit faite en tout point du signal.

$$(fst g)(x)=\int_{-\infty}^{+\infty}f(x-t)g(t)\,\mathrm{d}t=\int_{-\infty}^{+\infty}f(t)g(x-t)\,\mathrm{d}t$$

Dans notre cas du traitement de l'image comme des signaux discrets bidimensionnels, la formule devient une somme comme pour les suites :

$$(fst g)(n)=\sum_{m=-\infty}^{\infty}f(n-m)g(m)=\sum_{m=-\infty}^{\infty}f(m)g(n-m)$$

- Avec f la fonction du signal discret de l'image,
- g le noyau du filtre numérique,
- *n* le pixel traité et *m* le paramètre de convolution.

Convolution par un Dirac

Pour visualiser concrètement cette opération mathématique, considérons d'abord la convolution d'une fonction f(x) (par exemple une gaussienne) avec une impulsion de Dirac $\delta(x-a)$, centrée en un point a. La fonction Dirac peut être vue comme une impulsion infiniment haute et étroite, donc non nulle seulement en a. Alors, la multiplication f(x) par le dirac sera non nulle seulement en a. Quand on convolue f(x) avec un Dirac, la fonction f(x) est simplement translatée à la position f(x) avec un Dirac ne change pas la forme de la fonction, cela effectue uniquement une translation dans l'espace.

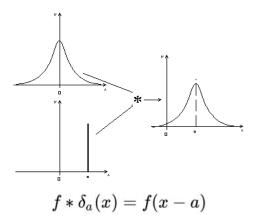


Figure 15 - Convolution d'une

fonction par un Dirac.

Convolution par une fonction Porte

Prenons maintenant une autre fonction : la fonction porte $P_{a,b}$. C'est une fonction qui vaut 1 entre deux bornes a et b, et 0 ailleurs. Graphiquement, elle ressemble à une porte posée sur l'axe horizontal. On peut interpréter une fonction porte comme une somme continue de Diracs uniformément répartis entre a et b. Lorsque l'on effectue la convolution d'une fonction f(x) par $P_{a,b}$, on glisse la porte le long de f(x). Visuellement, la convolution par

une fonction porte produit un élargissement de la fonction f(x), proportionnel à la largeur de [a,b].

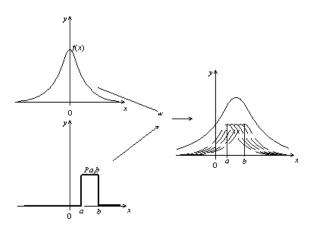


Figure 16 - Convolution d'une fonction par une fonction porte.

Convolution d'une matrice

Comme nous l'avons vu dans la seconde formule, la notion de convolution s'applique aussi bien aux fonctions continues qu'aux objets discrets et bidimensionnels. Dans ce dernier cas, l'intégrale est simplement remplacée par une somme sur des indices discrets. Chaque pixel d'une matrice peut être interprété comme une valeur f(x), tandis que chaque élément du noyau correspond à une valeur g(i,j). Pour effectuer la convolution de la matrice par un noyau, on place ce noyau autour de chaque pixel. À chaque position, on réalise le produit terme à terme entre les coefficients du noyau et les valeurs des pixels voisins. On additionne tous ces produits puis on normalise en divisant le résultat par la taille de la matrice. On obtient ainsi la nouvelle valeur du pixel. Finalement, la convolution entre une matrice et un noyau consiste à faire glisser ce dernier sur toute la matrice d'origine, recalculant ainsi chaque valeur en fonction de l'entourage du pixel. Ce principe constitue la base de nombreuses opérations en traitement numérique, où l'effet recherché dépend entièrement du choix du noyau utilisé.

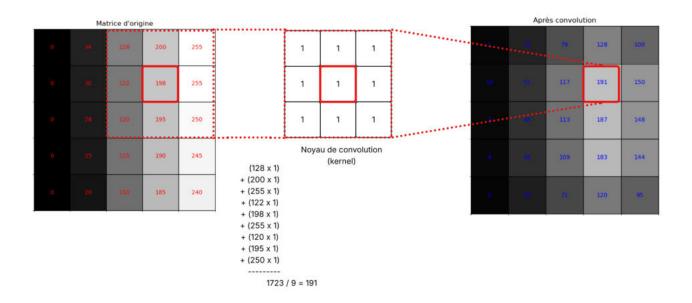


Figure 17 - Convolution d'une matrice par un noyau de convolution (kernel).

La modification des valeurs de notre noyau a un impact direct sur le résultat de notre nouvelle matrice après convolution. Grace à la convolution, on modifie les caractéristiques spatiales de notre image de référence. Cela permet de nombreuses applications : détection de contours, floutage, lissage, ou encore amélioration de la netteté. Selon la nature du noyau utilisé, il est possible soit de mettre en valeur les discontinuités, soit d'atténuer les détails fins, soit de renforcer les microcontrastes de l'image. On peut regrouper les noyaux de convolution selon trois grandes familles d'effets : les noyaux de détection de contours, les noyaux de lissage et les noyaux de renforcement.

Détection de contours et approximation du gradient

La détection de contours est particulièrement efficace via la convolution et elle revient à repérer les fortes variations d'intensité de l'image, autrement dit où son gradient est fort. Un des noyaux de convolution les plus utilisés pour cette opération est le noyau de Sobel. Son fonctionnement se base sur deux matrices de convolution qui vont balayer l'image et déterminer le gradient horizontal pour l'une et verticale pour l'autre. Les deux images

horizontale et verticale obtenues sont assemblées (afin d'obtenir une image composée seulement des forts contours. Ce filtre est particulièrement résistant au bruit de l'image ce qui explique son utilisation dans l'imagerie médicale par exemple sur des images de scanner. On peut noter aussi le filtre de Prewitt qui a une structure plus simple puisque composée d'une seule matrice et donc potentiellement plus rapide et efficace dans le traitement de l'image. Enfin le filtre Laplacien a la particularité de détecter les zones où l'intensité varie rapidement dans toutes les directions à la fois. La constitution de sa matrice permet qu'il se comporte de manière équivalente dans toutes les directions. Dans tous les cas, il est essentiel de souligner que ces opérations agissent en amplifiant les hautes fréquences spatiales de l'image: les détails fins et les transitions rapides sont renforcés, tandis que les régions uniformes sont supprimées.

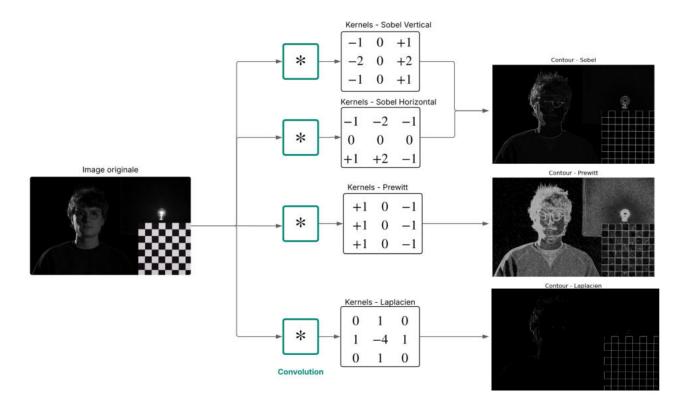


Figure 18 - Image convoluée par des noyaux à detection de bord.

Lissage d'images et suppression des hautes fréquences

Certaines opérations cherchent à atténuer les variations rapides pour obtenir un lissage de l'image. Le but est alors de réduire les hautes fréquences du spectre spatial, ce qui permet de diminuer le bruit, d'adoucir les textures, ou comme dans notre cas de simuler la perte de définition d'un système optique. Le lissage le plus simple repose sur la convolution par un noyau qui réalise des moyennes autour de chaque pixel (ou « chacun des pixels »), aussi appelé « Box Blur ». S'il est extrêmement rapide à appliquer, il présente néanmoins l'inconvénient d'introduire des artefacts visibles, notamment des effets de bavures autour des structures fines. Un autre filtre plus pertinent dans le traitement d'image est le filtre Gaussien. Dans celui-ci, la contribution des pixels voisins est moyennée selon une loi de Gauss, ce qui favorise les pixels proches du centre et réduit progressivement l'influence des pixels éloignés. Cette approche avec une fonction de type Gaussienne permet un adoucissement plus progressif et respecte mieux les structures globales de l'image. Dans le domaine fréquentiel, le filtre Gaussien agit comme un passe-bas, éliminant les hautes fréquences tout en préservant les basses. Lorsqu'on construit un grand noyau Gaussien, par exemple de taille 31x31 ou plus, la largeur de la Gaussienne est contrôlée par l'écart-type σ. Plus σ est élevé, plus la courbe est large et le floutage important. À noter que pour utiliser de tels filtres de flou lors de convolution, il est nécessaire de normaliser le noyau pour conserver la luminance globale de l'image. On cherche alors à avoir la somme des coefficients du noyau égale à 1. Sans cette normalisation, l'intensité moyenne de l'image serait artificiellement amplifiée ou atténuée.

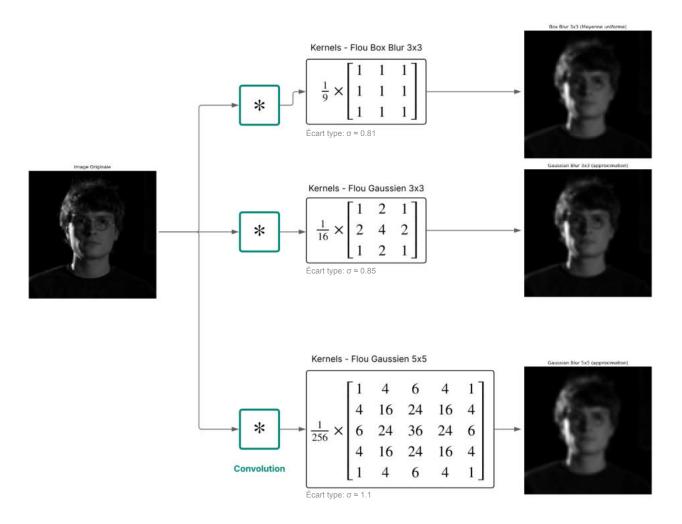


Figure 19 - Image convoluée par des noyaux à supression de hautes fréquences.

Renforcement et accentuation des détails

Enfin, certains noyaux de convolution visent non pas à supprimer les hautes fréquences, mais au contraire à les accentuer. Le but est d'améliorer la perception des détails et des contours, en donnant à l'image un aspect plus net. Le noyau de renforcement le plus simple consiste à appliquer un filtre de type Sharpening. Celui-ci combine dans son noyau une amplification du pixel central avec une atténuation pondérée de ses voisins immédiats. Cette opération agit comme un passe-haut localisé, en renforçant les transitions rapides tout en conservant la structure générale de l'image. Le renforcement de détail par

convolution est aussi largement utilisé dans les applications médicales, notamment pour améliorer la visibilité des structures fines dans les images IRM ou en microscopie.

Le choix du noyau, ainsi que sa taille, son orientation, et son mode de normalisation, dépendent donc directement des objectifs du traitement d'image considéré. Choisir un noyau précis fait de la convolution spatiale un outil puissant précisément parce qu'ainsi, elle permet d'opérer directement sur la distribution fréquentielle d'une image, tout en restant localisée en espace.

Déconvolution et applications scientifiques

À l'inverse de la convolution qui applique un flou ou un filtre, la déconvolution vise à restaurer une image altérée en éliminant l'effet d'un flou connu. D'un point de vue mathématique, elle consiste à inverser l'opération de convolution pour retrouver l'image d'origine avant son altération. Cette technique est particulièrement utile dans les domaines où la qualité d'image est très importante mais sujette à des dégradations optiques, comme en astronomie, en microscopie ou en imagerie médicale. Un télescope spatial comme celui d'Hubble connaît des corrections de ses images grâce à des algorithmes de déconvolution qui permettent de compenser un défaut de fabrication de ses miroirs4. En pratique, cette opération suppose de connaître ou d'estimer la fonction de flou appliquée (souvent une PSF), de réaliser l'opération inverse sans faire apparaître de bruit. Divers algorithmes ont été développés pour y répondre qui permettent une restauration progressive de l'image tout en contrôlant l'amplification du bruit. Si la déconvolution ne fait pas partie de notre pipeline de simulation, elle permet de comprendre l'aspect réversible de l'opération mathématique et une utilisation concrète dans le domaine scientifique.

⁴ Carasso A., Slanted-edge MTF for digital camera and scanner analysis, National Institute of Standards and

Convolution dans le domaine de Fourier

Après avoir étudié la FTM, la PSF et la convolution, on comprend que dans le domaine spatial, l'image formée résulte de la convolution entre l'objet et la PSF du système. Autrement dit, l'objet est modulé à travers le système optique, dont les imperfections sont inscrits dans la PSF. Dans le domaine fréquentiel, cette convolution devient une multiplication.

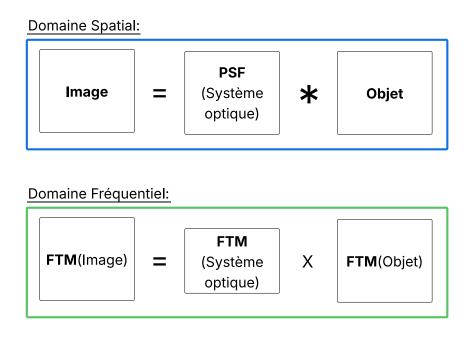


Figure 20 - Relation PSF/FTM.

Il est aussi important de noter que la FTM correspond au module de la transformée de Fourier de la PSF. Alors que la PSF décrit comment un point lumineux se répartit dans l'espace image, la FTM traduit cette information en fréquence mais sans prendre en compte la phase. Plus la PSF est étalée (c'est-à-dire plus le point image est flou), plus la FTM chute rapidement, traduisant une perte de contraste pour les hautes fréquences spatiales. Ce lien entre espace et fréquence sera fondamental dans notre étude pratique des filtres optique. En effet, l'hypothèse que nous formulons ici est la suivante : simuler un filtre optique revient à modéliser son impact sur l'image d'un objet, ce qui équivaut à déterminer sa PSF et à la convoluer avec une image.

II - Filtres de diffusion réels

II.1. La physique des filtres de diffusion

II.1.1. Interactions fondamentales

Avant de se plonger dans les outils d'analyse et de quantification de la diffusion de filtres optiques, il semble nécessaire de poser quelques informations fondamentales sur la nature de la lumière et sur les phénomènes physiques qui permettent de comprendre comment un filtre de diffusion agit sur une image. Placer une plaque de verre diffusante devant l'objectif est à l'origine d'une série d'interactions entre les rayons lumineux et la matière.

Nature de la lumière : une onde électromagnétique

La lumière est une onde électromagnétique qui peut être décomposée en une somme d'ondes monochromatiques, chacune caractérisée par une fréquence (f) et une longueur d'onde (λ) , liées par la relation:

$$c = \lambda \times f$$

où c est la vitesse de propagation dans le vide.

Chaque onde monochromatique peut être représentée par son **front d'onde**, défini comme la surface qui relie tous les points de l'espace où l'amplitude de l'onde présente la même phase. Autrement dit, le front d'onde représente la "crête" d'une même oscillation lumineuse dans l'espace. Sa forme dépend à la fois de la nature de la source et des propriétés du milieu traversé. Par exemple, une source ponctuelle émet un front d'onde sphérique, tandis qu'à grande distance, ce front devient localement plan. Cette représentation est particulièrement utile, car la direction de propagation de la lumière est,

localement, perpendiculaire au front d'onde : elle permet ainsi d'interpréter géométriquement la propagation de la lumière.

Réfraction

L'interaction de la lumière avec un filtre optique dépend de plusieurs phénomènes simultanés. Le premier est la réfraction: un changement de milieu entraîne une variation de la vitesse de phase de l'onde, ce qui modifie la courbure du front d'onde. Ce phénomène est décrit par les lois de Snell-Descartes et constitue le fondement de l'optique géométrique, à la base du fonctionnement des lentilles. Les filtres de diffusion n'ont pas pour but de focaliser la lumière mais de perturber subtilement sa trajectoire. Ils reposent pour cela principalement sur des phénomènes de diffusion et de diffraction:

Diffusion

La diffusion est la déviation des rayons lumineux lorsqu'ils rencontrent des structures de taille comparable ou supérieure à leur longueur d'onde. Selon la taille des particules ou irrégularités présentes dans le filtre, on parle de diffusion de Rayleigh (très petites particules) ou de diffusion de Mie (particules plus grandes). Un filtre diffusant provoque alors un adoucissement local de l'image: c'est une baisse du contraste localisée et un étalement des hautes lumières.

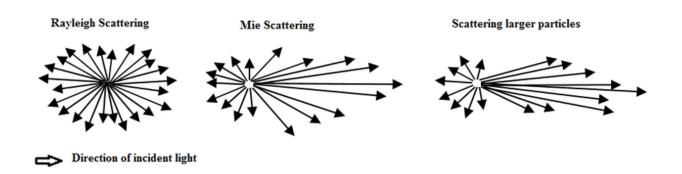
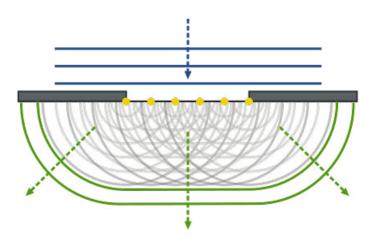


Figure 21 - Différents types de diffusion en fonction de la taille de la particule.

Source: Chew, W. C. (2019). *Lecture 34 – Electromagnetic Field Theory* [Notes de cours ECE 604]. Purdue University. p347 https://engineering.purdue.edu/wcchew/ece604f19/Lecture%20Notes/Lect34.pdf

Diffraction

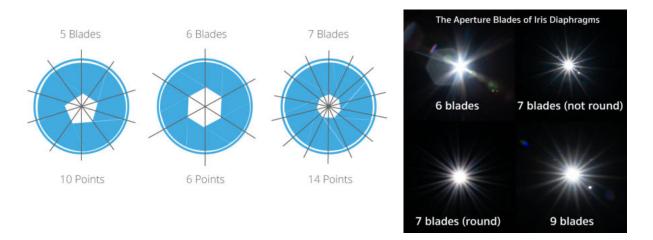
La diffraction désigne le comportement des ondes lumineuses lorsqu'elles rencontrent un obstacle ou une ouverture dont la taille est comparable, ou inférieure, à leur longueur d'onde. Ce phénomène se traduit par une déformation du front d'onde, qui ne suit plus une trajectoire strictement rectiligne. Pour comprendre cette déformation, on peut faire appel au principe de Huygens-Fresnel, selon lequel chaque point d'un front d'onde incident se comporte comme une source secondaire émettant des ondes élémentaires. Ces ondes secondaires interfèrent entre elles et génèrent un nouveau front d'onde résultant, dont la forme dépend de la géométrie de l'ouverture et des interactions locales. L'image de la figure 22 illustre ce phénomène : des ondes planes arrivent sur une ouverture. Les points situés sur le bord de cette ouverture deviennent autant de sources secondaires dont chacune émet des ondes sphériques qui se superposent pour former une nouvelle onde diffractée. Cette superposition engendre un changement de forme du front d'onde et donc une modification des directions de propagation de l'onde.



<u>Figure 22 - Principe de Huygens-Fresnel et mise en</u> évidence des sources secondaires.

Cas réel: diffraction par un diaphragme

Nous avons vu la correspondance entre objet diffractant et sa représentation dans le domaine de Fourier, il devient intéressant de se pencher sur un phénomène concret que nous avons déjà tous observé sur de fortes sources lumineuses. Le phénomène de diffraction par l'ouverture du diaphragme apparaît lorsqu'une forte source lumineuse dans le champ nous donne à voir non pas un point mais une tache entourée d'un étalement de lumière secondaire. On remarque alors que chaque lame de diaphragme crée une paire de pics lumineux. L'objet diffractant étant symétrique, son image l'est aussi. On observe alors le double du nombre de pics lumineux par rapport au nombre de lames du diaphragme. Ce même phénomène dû à la diffraction de Fraunhofer s'observe dans tout autre système optique, y compris dans l'œil humain. En effet, de fortes sources lumineuses au travers de la pupille génèrent elles aussi des phénomènes de diffraction caractéristiques d'un cercle non uniforme. Les flamboiements autour des lampadaires ou les étoiles qui "bavent" la nuit en sont une conséquence. La taille de ces figures dépend de la longueur d'onde. Plus la longueur d'onde est grande, plus grande sera la tache.



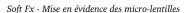
<u>Figure 23 - Apparition d'étalements de lumières en fonction du nombre de lames de diaphragmes.</u>

II.1.2. Fonctionnement des filtres de diffusion

Ces phénomènes physiques se retrouvent au coeur du fonctionnement des filtres de diffusion et leur dosage permet un contrôle de la modification de l'image. Les marques de filtres professionnels (Tiffen, Schneider...) sont généralement constitués de deux plaques de verre entre lesquelles une structure (micro-lentille, trame...) est encapsulée. Selon sa densité, sa granulométrie et sa distribution spatiale, cette structure agit comme un champ d'irrégularités réfractantes et diffusantes. L'étude détaillée dans le mémoire de Basile Baudelet de 2018 sur la composition des filtres de diffusion nous montre que trois catégories de filtre de diffusion font intervenir trois différents type de micro-structures:

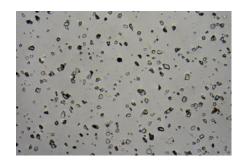
- Les filtres de diffusion de netteté (comme les Soft Fx de Tiffen) éliminent les détails très fins à l'aide de micro-lentilles, faisant principalement intervenir le phénomène de réfraction lorsque la lumière les traversent.
- Les filtres de diffusion des hautes lumières (comme les Promist de Tiffen) sont quant à eux composés de structures plus fines, solides et aux formes aléatoires qui jouent sur les phénomènes de diffusion.
- Les filtres de baisse de contraste (ici Low Contraste de Tiffen) sont composés de structures solides sombres et semblent avoir un comportement assez proche des Pro-Mist et ont comme effet de rehausser les basses lumières, créant un effet global de flare sur l'image.







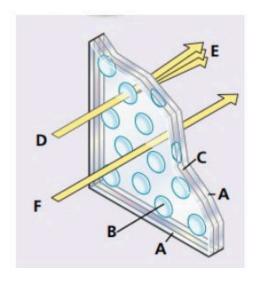
Pro-Mist - Mise en évidence des éléments minéraux



Low Contrast - Mise en évidence des éléments minéraux

Figure 24 - Filtres Tiffen vue au microscope dans le mémoire de Basile Baudelet de 2018.

Ainsi, l'image formée à travers un filtre de diffusion peut être comprise comme la superposition de deux images. Une image nette, correspondant à la portion de lumière qui traverse le filtre sans interagir avec les microstructures. Et une image diffuse, plus étalée spatialement, générée par la lumière qui entre en interaction avec ces microstructures, subissant des phénomènes de diffusion, de réfraction locale, ou de diffraction. Cette superposition ne modifie pas nécessairement la mise au point de l'image (la netteté peut être conservée localement), mais altère la perception des hautes fréquences spatiales, notamment par un étalement des hautes lumières et une baisse de contraste des microdétails. Autrement dit, le filtre ne remplace pas l'image nette par une image floue, mais y ajoute une composante diffuse, ce qui explique pourquoi certaines zones de l'image peuvent rester relativement intactes, tandis que les hautes lumières se diffusent autour de leur source.



- *A Deux* plaques de verre optique
- B Micro-lentilles
- C Trous d'air
- D Rayon lumineux traversant le filtre
- E Rayons réfractés par les micro-lentilles
- F Rayon lumineux traversant le filtre sans modification de l'imge

Figure 25 - Fonctionnement d'un Classic Soft, filtre de réduction de netteté, brochure de Shneider's Optics.

II.2. Étude quantitative de la diffusion des filtres optiques

II.2.1. Essais et mise en place d'un protocole

Après avoir étudié les phénomènes physiques impliqués dans le fonctionnement d'un filtre, il devient pertinent d'examiner des cas pratiques afin de mettre en évidence un lien entre filtre optique et filtre numérique. Cette partie est dédiée à l'étude quantitative de la diffusion optique, dans le but de la simuler dans la suite du mémoire. Pour cela, on fait l'hypothèse que la fonction d'étalement du point (PSF), et donc la fonction de transfert de modulation (FTM) qui lui est liée, intègre les effets conjoints de la réfraction, de la diffusion et de la diffraction. On cherche notamment à quantifier la perte de résolution induite par le filtre. L'enjeu est donc de vérifier si ces fonctions permettent effectivement de représenter à la fois les pertes de détails et les modifications des hautes lumières comme le ferait un vrai filtre optique.

DXO

L'une des premières solutions pour obtenir rapidement des informations concernant la perte de contraste en fonction des fréquences spatiales induites par un filtre a été l'utilisation du logiciel DxO. Ce logiciel de l'entreprise française DxOMark, spécialisé dans la photographie, permet d'analyser des images de leur mire propriétaire, afin de caractériser le couple capteur/objectif. Il offre un accès rapide à la fonction de transfert de modulation, renseignant sur le rendu de détails global. Il permet aussi de voir les aberrations optiques présentes en divers points de l'image ainsi que sur les différents canaux R, V, B. Il permet d'observer des aberrations chromatiques induites par l'objectif. En détournant légèrement l'utilisation prévue de ce logiciel, notre objectif initial était de déterminer la FTM d'un couple objectif/capteur, puis celle de ce même couple en présence d'un filtre optique placé devant. Nous avons choisi pour cela la caméra FX3, capable de capturer des images en RAW, couplée à un objectif Sigma 50mm.

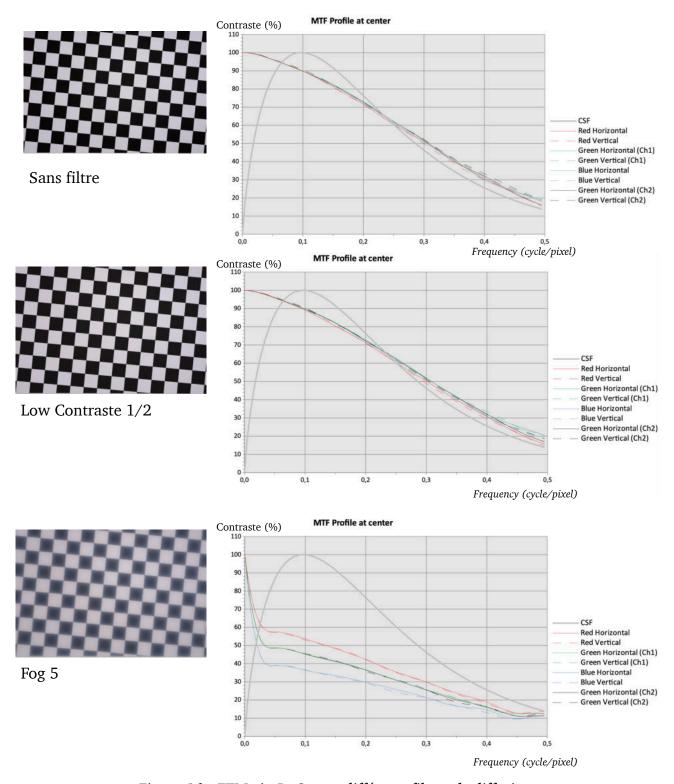


Figure 26 - FTM via DxO avec différents filtres de diffusion.

Dans les courbes FTM générées par DxO, la courbe "CSF" correspond à la "Contrast Sensitivity Function". Elle ne mesure pas une propriété de l'objectif ou du capteur, mais modélise la capacité de l'œil humain à percevoir des contrastes selon la fréquence spatiale (en cycles par pixel ici).

L'ouverture a été fixée à f/5.6 afin de limiter au maximum les aberrations de l'objectif. Nous obtenons ainsi deux courbes FTM avec les mêmes paramètres, avec et sans filtre. À titre d'exemple, l'utilisation d'un filtre Fog 5 permet de mettre en évidence la déformation de la FTM: on observe alors une perte significative de contraste dans les basses fréquences de l'image, c'est-à-dire dans les zones uniformes (aplats). En réalisant le même test avec un filtre plus subtil (ici un Low Contrast 1/2), la différence entre les deux courbes FTM devient à peine perceptible.

Limite de DxO

Comme nous avons vu précédemment, on cherche à isoler la PSF du filtre. En effet notre hypothèse repose sur le fait qu'une image diffusée correspond à la convolution entre une image sans filtre et la PSF du filtre optique:

Image diffusée = Image sans filtre * PSF(filtre)

Dans le domaine fréquentiel, on en déduit que la FTM de l'image diffusée correspond à la multiplication entre la FTM de l'image sans filtre par la FTM du filtre. On pourrait alors via les FTM fournies par DxO isoler la FTM du filtre en divisant la FTM de l'image diffusée par la FTM de l'image sans filtre:

FTM (Image diffuse) = $FTM(filtre) \times FTM$ (Image sans filtre)

⇒ FTM(filtre) = FTM (Image diffuse) / FTM (Image sans filtre)

Les données fournies par DxO deviennent en réalité limitantes car l'affichage unique de la FTM réduit considérablement nos possibilités d'exploitation. En effet, l'une des principales limitations tient à la perte d'information en passant du domaine fréquentiel vers le domaine spatial. La transformée de Fourier d'un signal réel est généralement complexe :

$$F[f(x)] = A(f) \cdot ei\phi(f)$$

A(f) est l'amplitude.

 $\phi(f)$ est la phase qui encode la position des structures dans l'espace.

Or, la PSF est obtenue à partir de la transformée de Fourier complexe inverse de la FTM. N'ayant pas le terme de phase dans la FTM, la PSF ne peut pas être reconstituée de cette manière. Ainsi, même si DxO nous permet un comparatif rapide de courbes FTM, le fait qu'il ne fournisse pas les données brutes (amplitude + phase) nous empêche d'exploiter les acquisitions optiques. Cela nous conduit donc à envisager la mise en place de notre propre solution d'acquisition, plus adaptée à cette problématiques.

Technique du bord incliné

Pour extraire des données fréquentielles, DxO utilise une mire en s'appuyant sur l'analyse des transitions nettes entre des zones noires et blanches, à différents endroits de l'image. Cette méthode du bord incliné (*Slanted Edge*) est l'une des plus couramment employées pour mesurer la FTM, car elle permet une évaluation efficace, rapide et complète de la réponse fréquentielle d'un système optique. Un bord net (par exemple, noir d'un côté, blanc de l'autre) peut être modélisé par une fonction en escalier comme on pourrait le voir sur un oscilloscope. Les valeurs sont d'abord faibles puis rapidement hautes, laissant apparaître

une marche nous permettant de voir la transition. Pour reconstruire un tel signal à l'aide de sinusoïdes il faut combiner des basses fréquences, qui traduisent la structure globale (la transition douce entre les zones), avec des hautes fréquences, qui représentent les détails fins, notamment la discontinuité abrupte. Plus la transition est brutale, plus elle contient de hautes fréquences.

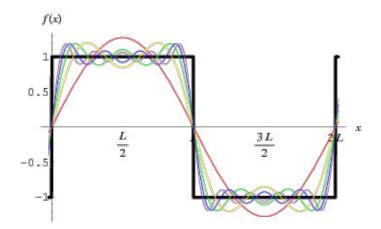


Figure 27 – Approximation d'un signal créneau par la somme des 5 premières harmoniques d'une série de Fourier.

L'exemple de la <u>figure 27</u> nous montre un signal en créneau (en noir) est reconstitué en sommant cinq sinusoïdes de fréquences multiples d'une fréquence fondamentale (représentée en rouge). Les hautes fréquences (harmoniques) participent à la restitution des détails abrupts du signal. Prenons maintenant le cas d'un système optique dont la PSF est étalée : cela se traduit par une atténuation des hautes fréquences spatiales, ce qui adoucit la transition entre zones sombres et claires. Les contours deviennent alors moins nets, plus progressifs. Pour évaluer cette transition, on utilise une mire avec un bord net entre une zone noir et blanche. Il est important de noter que l'inclinaison (entre 5° et 10°)

de ce bord par rapport à la grille du capteur n'est pas anodine : elle est définie par une norme (ISO 12233)⁵ et répond à plusieurs enjeux.

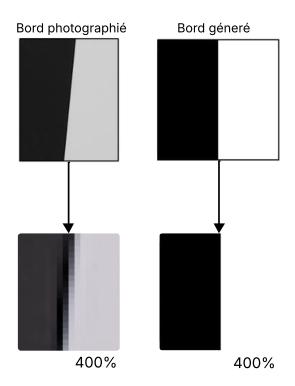


Figure 28 - Bord incliné photographié sur mirre et bord numérique.

Cette inclinaison permet d'abord un sur-échantillonnage. En inclinant le bord par rapport aux axes horizontaux et verticaux du capteur, on obtient des positions intermédiaires entre pixels. Si le bord n'était pas incliné, tous les pixels d'une même ligne passeraient du noir au blanc au même endroit. En l'inclinant, on obtient des échantillons intermédiaires entre pixels et on peut avoir un moyenne plus précise du rendu du bord au travers du système optique. Mais l'inclinaison permet surtout de limiter les artefacts d'aliasing (ou repliement spectral), qui apparaissent lorsque des fréquences spatiales sont supérieures à la fréquence d'échantillonnage du capteur. En effet le critère de Nyquist nous dit que « la fréquence

⁵ Organisation internationale de normalisation (ISO), ISO 12233:2024(en), Photography — Electronic still picture imaging — Resolution and spatial frequency responses, Genève, ISO, 2024.

spatiale maximale de l'image doit être inférieure à la moitié de la fréquence d'échantillonnage » ⁶. Si ce critère n'est pas vérifié, un moiré pourrait apparaître, faussant notre analyse du bord. L'inclinaison permet justement d'éviter que le bord ne tombe à cheval entre deux photosites, et limite les risques d'alignement parfait avec la grille du capteur, réduisant ainsi ces effets indésirables. Cependant, afin de s'affranchir de ces artefacts liés à l'échantillonnage capteur, notre code a d'abord été développé et testé sur une image numérique artificielle, non acquise par un système optique. Cela nous a permis d'utiliser un bord vertical parfaitement défini, généré sous Photoshop, sur une image de 2000 × 2000 pixels, avec des valeurs nulles (noir) à gauche, et des valeurs de 255 (blanc) à droite.

<u>Développement de la FTM</u>

Nous cherchons dans un premier temps à développer un code en Python permettant d'extraire la FTM à partir d'un bord incliné. En suivant les recommandations de la norme ISO 12233, nous adoptons une approche classique qui consiste à étudier d'abord la fonction d'étalement du bord (Edge Spread Function – ESF), qui nous permettra ensuite de déduire la Line Spread Function (LSF), et enfin d'en déduire la FTM.

La première étape de ce processus consiste à extraire une ligne de notre image test. Par simplicité, nous choisissons arbitrairement la ligne centrale, mais il sera pertinent, dans un second temps, de moyenner plusieurs lignes afin de réduire le bruit aléatoire. Cette ligne, une fois représentée en affichant l'intensité des pixels en fonction de leur position, constitue déjà la ESF. On y observe, pour un bord parfaitement net, une transition brutale entre des valeurs de 0 (noir) à 255 (blanc) au centre de l'image.

⁶ BELLAÏCHE, Philippe, Les secrets de l'image vidéo, 11^e éd., Paris, Dunod, p. 238.

La deuxième étape consiste à calculer la Line Spread Function. La LSF correspond à la dérivée première de la ESF, et représente en une dimension l'étalement d'un point image à travers le système optique. On choisit d'utiliser dans notre code la fonction Diff (np.diff) de la bibliothèque Numpy spécialisée dans les outils mathématiques. Dans notre cas, comme nous simulons un bord numérique parfait sans flou optique, la LSF se manifeste sous la forme d'un pic très étroit, proche d'un Dirac, puisqu'aucune déformation n'est introduite. On suppose donc que la PSF est un point unique.

Enfin, pour obtenir la FTM, nous appliquons la transformée de Fourier à la LSF, en utilisant la fonction Fast Fourier Transform (np.fft.fft) de la bibliothèque NumPy. Avant cette opération, la LSF est multipliée par une fenêtre de Hamming. C'est ce que l'on appelle le fenêtrage. Cette opération est courante en traitement du signal lorsqu'on travaille avec des signaux de longueur finie. Elle permet de limiter certains artefacts dans le domaine fréquentiel, en réduisant les effets de bords. En effet, même si la fenêtre coupe le signal, elle le fait de manière progressive, ce qui évite les coupures nettes. Le signal obtenu est ensuite recentré (via la fonction np.fftshift) et normalisé pour faciliter l'interprétation. Pour cela, on divise la FTM par sa valeur maximale pour obtenir son amplitude entre 0 et 1. On obtient ainsi la fonction de transfert de modulation, qui décrit comment le contraste varie en fonction de la fréquence spatiale. Cela nous renseigne sur la capacité d'un système optique à restituer les détails fins d'une image. Nous avons ainsi obtenu la LSF qui nous servira comme base dans notre programme de simulation de filtre optique et une FTM pour visualiser la perte de détail associé à chaque filtre.

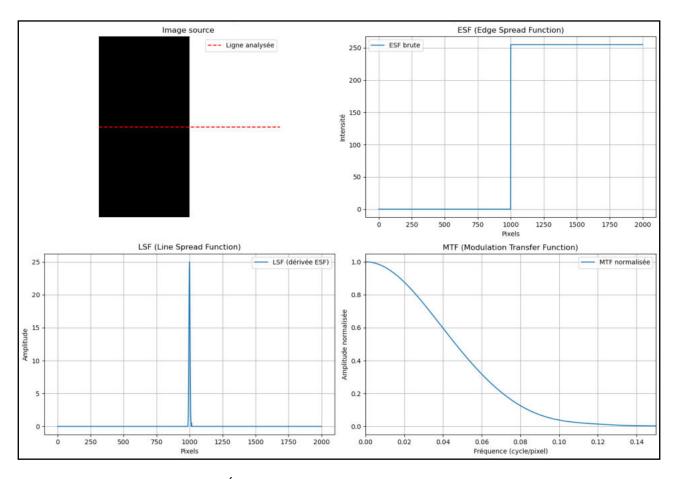


Figure 29 - Étapes d'obtention d'une FTM d'un bord droit.

Simulation de défauts optiques : le fonction gaussienne

Afin de mettre en place notre code pour simuler des défauts otpiques, nous utiliserons la fonction gaussienne comme fonction de flou pour notre noyau de convolution. Cette dernière dépend d'un paramètre central, l'écart-type (sigma σ), qui contrôle la largeur de la courbe et donc l'intensité du flou appliqué. On floute notre image en la convoluant par un noyau gaussien, simulant ainsi la perte de résolution de notre image par une fonction connue et paramétrable.

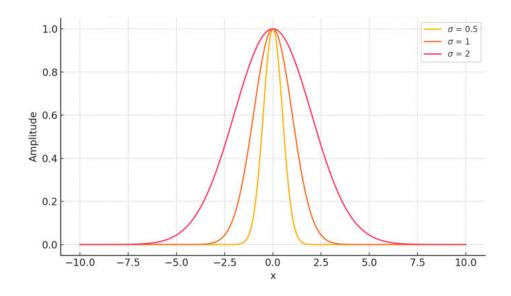
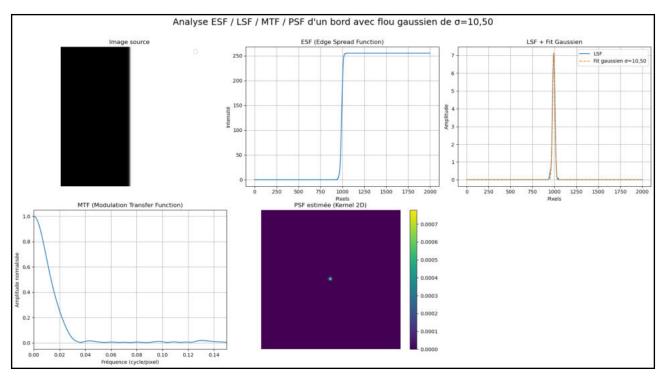


Figure 30 - Fonction gaussienne pour différentes valeurs de σ.

On peut voir sur la <u>figure 31</u> que lorsque l'écart-type augmente, on remarque que les valeurs de transition dans la ESF deviennent progressivement plus douces, la LSF s'élargit, et la FTM montre une perte progressive des hautes fréquences. Cela se traduit par une baisse du contraste dans les détails fins de l'image. En ajustant une gaussienne sur les points de la LSF simulée (procédé connu sous le nom de curve fitting), on retrouve un écart-type proche de celui appliqué initialement à l'image. Cette correspondance nous assure que notre programme fonctionne sans introduire d'erreurs fondamentales puisque l'écart-type estimé via la LSF de notre bord droit correspond à l'écart-type appliqué au départ. La fonction gaussienne nous a servi de référence pour tester le fonctionnement du programme car on retrouve la forme de la courbe de la gaussienne à partir d'une image convoluée par cette fonction. On peut alors valider la capacité de notre code à déterminer une LSF à partir d'un bord droit.



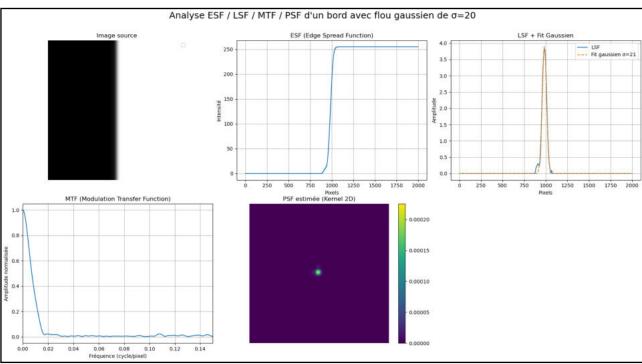


Figure 31 - ESF/LSF/FTM d'un bord droit convolué par un noyau gaussien.

Nous utiliserons plus tard cette même fonction gaussienne comme base pour simuler des filtres optiques plus complexes. Dans la continuité du développement du programme, nous allons aussi faire une visualisation en deux dimensions de la LSF, qui permet d'obtenir la PSF. En effet, la LSF peut être vue comme une section ou un profil de la PSF, si l'on suppose que celle-ci est isotrope, c'est-à-dire identique dans toutes les directions. Pour cela, nous normalisons d'abord la LSF, puis nous effectuons une transformation de la LSF de une à deux dimensions à l'aide de la fonction *np.outer* de la bibliothèque NumPy. Cette opération permet de déployer la LSF selon les deux axes, projetant ainsi la fonction tout autour d'un point central. Le résultat est une image circulaire d'intensité maximale au centre, décroissant progressivement vers les bords. On obtient alors une simulation réaliste de la PSF gaussienne en deux dimensions.

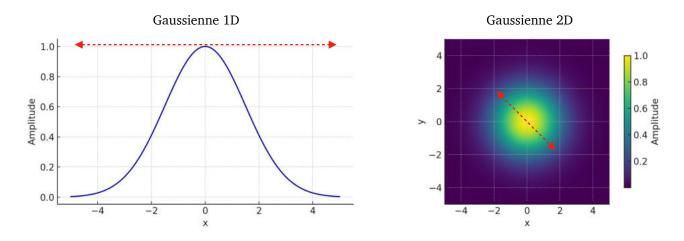


Figure 32 - Déploiement d'une LSF (1D) en PSF (2D).

Cas pratique: Scatter

Scatter est un plug-in de l'entreprise Vidéo Village pour le logiciel Davinci Resolve. Il permet de simuler numériquement des filtres optiques. Il constitue donc un excellent support d'analyse pour tester notre code, tout en offrant une opportunité d'étudier comment le plug-in se comporte lorsqu'il simule différents types de filtres. En appliquant une simulation de filtre via Scatter avec différentes intensités (dans la figure 33: Pro-Mist 1/8, 1/2, 1 et 2) sur le bord droit numérique utilisé précédemment, on observe des variations significatives dans la forme de la ESF. Les quatre courbes nous montrent que plus la valeur du filtre augmente, plus le pied de courbe (la transition au bas de la ESF) se décolle rapidement, traduisant une progression plus douce du bord. Un autre aspect important à noter dans l'évolution de la ESF concerne le haut de la courbe, où l'effet de diffusion disparaît. Cela vaut pour la majorité des filtres disponibles via le plug-in: la marche supérieure de la courbe reste franche et forme un angle droit à partir des valeurs d'intensité de 200. Ce comportement est essentiel à comprendre puisqu'il explique pourquoi, malgré l'ajout de diffusion, une impression de netteté est préservée. Bien que l'image soit diffusée, le bord principal reste visuellement présent, conservant cette sensation de netteté. Ce mécanisme simule le fonctionnement des filtres optiques de diffusion. Il conserve une image nette tout en y superposant une image floutée pour diffuser les hautes lumières sans sacrifier la lisibilité des contours. Cette émulation du comportement optique réel deviendra l'un des fondements de notre propre approche de simulation.

La comparaison avec un flou gaussien est particulièrement intéressante. Si, à première vue, le bas de courbe de la ESF présente un comportement similaire (progression graduelle), la structure précise du pied diffère d'un effet à l'autre, chaque filtre numérique ayant son propre comportement. Surtout, dans le cas du flou gaussien, le haut de la courbe est symétrique par rapport au pied : on y perd complètement la netteté du bord, ce qui est moins le cas avec Scatter. La FTM simulée avec les images provenant de Scatter montre une

perte progressive et globalement régulière du contraste à mesure que la fréquence spatiale augmente, ce qui est attendu lorsque l'intensité du filtre augmente. Cela confirme la dégradation mesurée de la capacité du système à transmettre les détails fins.

En analysant maintenant la PSF de notre *figure 33*, on remarque d'abord une augmentation de sa taille avec l'intensité du filtre. Comme dans le cas d'un vrai filtre physique, plus le flou est prononcé, plus l'image d'un point s'étale. La résolution du système optique baisse, la tâche de lumière s'élargit. Ce phénomène est accompagné d'une baisse d'intensité au centre de la PSF : la lumière se répartit sur une plus grande surface, le pic lumineux central diminue, et l'on s'éloigne de plus en plus du profil de Dirac.

Une dernière observation notable concerne la forme non symétrique de cette PSF. Cette asymétrie découle directement de la marche nette observée dans la partie supérieure de la ESF. La LSF qui en résulte est elle aussi asymétrique, et sa projection en deux dimensions reflète cette particularité. Le plug-in maintient, même avec une diffusion importante, une forte conservation du bord. Cette propriété, visible aussi bien dans la ESF que dans la PSF, est l'un des éléments clés qui distinguent la simulation Scatter d'un simple filtre de flou.

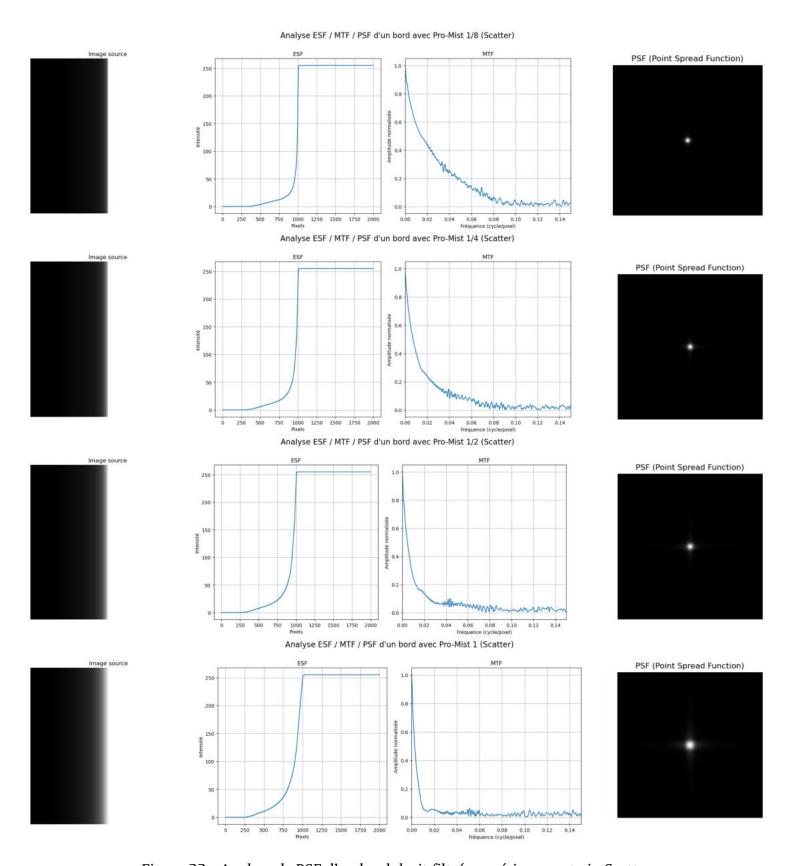


Figure 33 - Analyse de PSF d'un bord droit filtré numériquement via Scatter.

```
# Bibliothèques utilisées
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from PIL import Image
from scipy ndimage import gaussian_filter1d
from scipy.optimize import curve_fit
# Paramètres
gamma = 2.4
sigma = 1
# Chargement de l'image
image = Image.open(« Bord_Numérique.png »)
# Image extraite en tableau (array) et sélection du canal vert
image_array = np.array(image)[:, :, 1]
# Calcul ESF - Moyenne de toutes les lignes
bord_array = (np.sum(image_array, axis=0) / np.sum(image_array, axis=0).max())
* gamma
# Lissage des valeurs de la ESF
bord_lisse = gaussian_filter1d(bord_array, sigma=sigma)
# Calcul LSF — Dérivée de la ESF
lsf_array = np.diff(bord_lisse)
# Lissage de la LSF
lsf_lisse = gaussian_filter1d(lsf_array, sigma=sigma)
# Calcul PSF 1D - Normalisation de la LSF
PSF_1d = lsf_lisse / np.sum(lsf_lisse)
# Calcul PSF 2D - Projection 2D de la PSF 1D
taille_PSF = len(PSF 1d)
PSF_2d = np.outer(PSF_1d, PSF 1d)
# Curve Fitting d'une gaussienne sous la LSF
def gauss(x, a, x0, sigma):
    return a * np_exp(-((x - x0) ** 2) / (2 * sigma**2))
x_data = np.arange(len(PSF_1d))
popt, _ = curve_fit(gauss, x_data, PSF_1d, p0=[1, len(PSF_1d) // 2, 10])
sigma estime = popt[2]
# Calcul FTM - Fast Fourier Transform
mtf = np.abs(np.fft.fftshift(np.fft.fft(lsf_array)))
# Normalisation et sélection de la moitié de la FTM
mtf = mtf[len(mtf)//2:]
mtf_norm = mtf / np.max(mtf)
# Lissage de la FTM
mtf_lisse = gaussian_filter1d(mtf_norm, sigma=sigma)
# Récuperation de la bonne échelle des fréquences pour l'affichage de la FTM
freq = np.fft.fftshift(np.fft.fftfreq(len(lsf_array)))
freq = freq[len(freq)//2:]
# Voir annexe pour le code complet
```

Figure 34 - Détail du code Python.

II.2.2. Acquisitions des PSF des filtres de diffusion

L'analyse de filtres optiques réels s'inscrit dans la continuité directe de la méthode et du code développés précédemment. Toutefois, quelques ajustements sont nécessaires pour adapter notre approche à l'exploitation de véritables images acquises à la caméra, contrairement aux cas précédents où tout était simulé numériquement.

Conception de la mire

Les expérimentations menées à l'aide d'une mire numérique et de diffusions artificielles nous ont permis d'identifier à la fois un objet de diffraction pertinent à filmer, et une méthode standardisée pour extraire les caractéristiques d'un filtre. On sait désormais qu'un bord incliné est une structure idéale pour obtenir la FTM, permettant d'observer la perte de contraste en fonction de la fréquence spatiale, mais aussi une PSF, qui définira le comportement optique du filtre et permettra de le simuler sur une image neutre.

Pour obtenir des données exploitables à partir de filtres optiques réels, nous avons donc conçu notre propre bord incliné. Là où la mire DxO repose sur une observation par réflexion (la lumière est réfléchie par la partie blanche de la mire), nous avons choisi une approche par transmission lumineuse. Un bord noir incliné est placé devant une sphère d'intégration émettant sa propre lumière. Cette construction nous permet d'obtenir un contraste plus élevé, et donc un signal plus riche en information sur le phénomène de diffusion. Le contrôle de l'intensité lumineuse de la source permet de moduler plus précisément le déploiement du phénomène de diffraction.



Figure 35 - Mire de test à bord incliné.

Amélioration du code

Avant de pouvoir exploiter correctement nos données issues de prises de vue réelles, une modification importante du code est nécessaire. Jusqu'ici, pour traiter nos images simulées, nous réalisions une simple moyenne des pixels ligne par ligne pour extraire la ESF. Ce traitement devient inadapté pour un véritable bord incliné, où l'alignement avec les lignes du capteur devient un risque de moiré.

Conformément à la norme ISO 12233, nous devons désormais pour chaque ligne de l'image repérer la position du bord en identifiant l'endroit où la difference de valeur entre le noir et le blanc est maximale. Ce point représente la position estimée du bord pour cette ligne. L'étape suivante consiste à tracer une droite passant par tous ces points : c'est une régression de la position du bord incliné. On redresse ensuite cette droite dans un tableau, en réalignant les pixels en fonction de cette nouvelle droite. Cette transformation permet d'obtenir une ESF droite, équivalente à celle obtenue numériquement, et introduit au passage un paramètre d'échantillonnage utile pour lisser les valeurs et réduire le bruit.

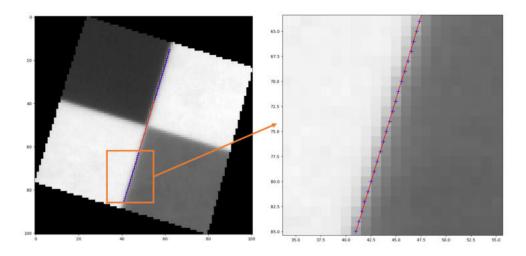


Figure 36 - Mise en avant de la régression de la position du bord incliné.

Choix des filtres testés

Pour nos mesures, nous avons sélectionné une série de filtres Tiffen, classés par le constructeur selon des caractéristiques bien identifiées. Notre sélection se divise en trois grandes familles, correspondant à des orientations spécifiques de rendu comme vue au début de ce chapitre.

- Les Soft FX, conçus pour atténuer les détails fins.
- Les Pro-Mist, destinés à diffuser les hautes lumières.
- Les Low Contrast, qui réduisent le contraste global de l'image.

Ce choix n'a pas pour but de couvrir l'ensemble des filtres disponibles mais plutôt de représenter un échantillon de filtres courants encore régulièrement utilisés et surtout souvant simulés par des plug-ins. Ces trois filtres sont d'ailleurs disponibles dans le plug-in Scatter, ce qui facilitera leur comparaison directe avec les résultats issus des simulations numériques.

Récupération des PSF

Grâce à l'utilisation de la mire à bord incliné et aux modifications apportées au code (dématriçage, régression du bord incliné), nous sommes en mesure de déterminer ESF, la FTM ainsi que la PSF pour nos trois types de filtres. Bien que les variations observées soient légères, elles révèlent néanmoins des comportements distincts selon le type de filtre. Ces différences d'information sont encodées dans les PSF spécifiques à chaque filtre, constituant ainsi la base de notre simulation numérique de diffusion.

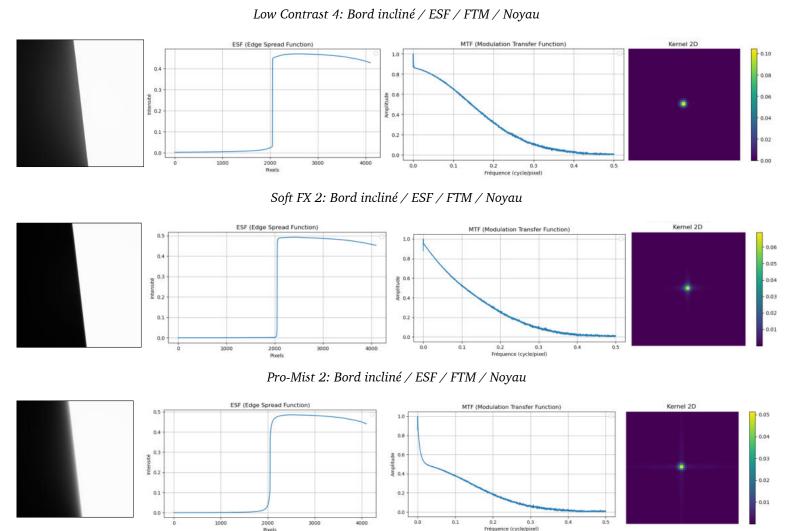


Figure 37 - Analyse de la PSF d'un bord incliné avec filtres optiques.

III - Émulation Numérique

III.1. - Fonctionnement du code

Jusqu'à présent, notre code permettait de prendre l'image d'un bord droit, d'en extraire la PSF et de produire une FTM. Maintenant que nous avons vu le principe de convolution nous pouvons aller plus loin dans l'élaboration d'un émulateur de filtre optique. Le principe général repose sur l'utilisation d'une image d'entrée neutre, réalisée sans filtre optique, qui est soumise à différentes opérations préparatoires avant d'être convoluée par une Point Spread Function (PSF) spécifique. L'image utilisée en entrée est d'abord linéarisée pour s'affranchir de toute correction gamma et obtenir une représentation proportionnelle à la luminance réelle. Une fois cette image préparée, elle est convoluée par un noyau, lui-même construit à partir d'une Line Spread Function (LSF) mesurée sur une image de bord avec filtre optique, extraite, lissée, et projetée en deux dimensions par un produit afin d'obtenir un comportement isotrope. La convolution de l'image linéarisée par ce noyau permet ainsi de reproduire un effet de flou cohérent avec l'étalement lumineux observé sur des images prises avec un filtre optique. Cependant, la sortie de cette seule convolution ne constitue pas l'image finale. Afin de contrôler précisément la puissance de l'effet de diffusion et d'éviter un flou global excessif, l'image floutée est recombinée avec l'image nette d'origine selon un rapport pondéré. Ce mélange est réalisé de manière linéaire, en attribuant un coefficient à l'image floutée et son complémentaire à l'image nette. Cette étape de recombinaison est une hypothèse pour chercher à simuler numériquement l'augmentation des particules diffusantes en fonction de la densité des filtres optiques. On cherche ainsi à ajuster avec finesse l'intensité de l'effet simulé, en agissant sur la proportion relative de lumière diffuse présente dans l'image finale.

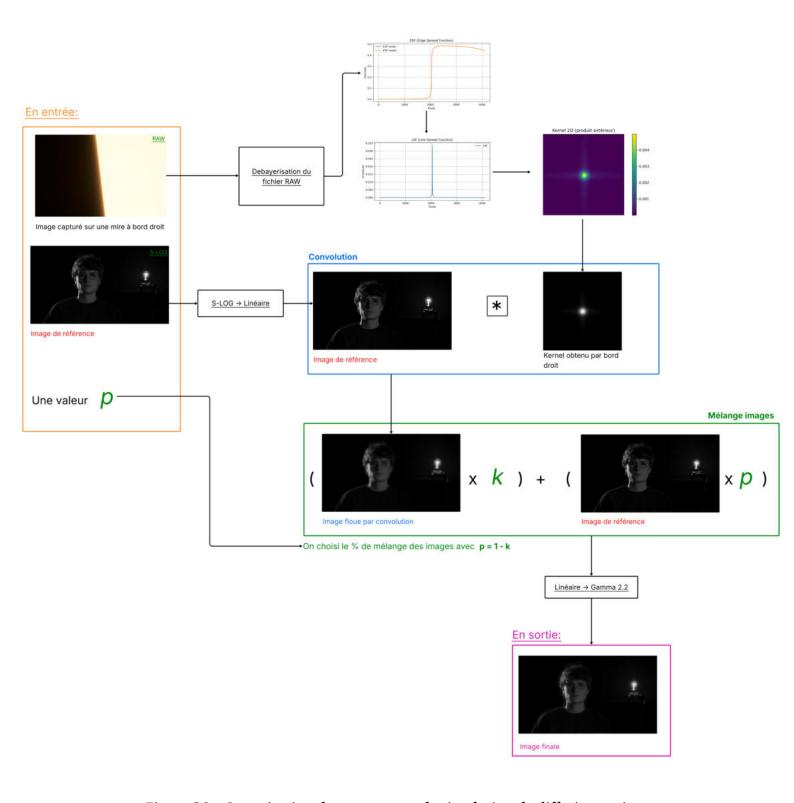


Figure 38 - Organisation du programme de simulation de diffusion optique.

Explication détaillée du choix de la convolution

Comme nous l'avons vu avec les différentes formes de convolution existantes, cette opération mathématique est particulièrement efficace pour flouter une image. Elle constitue un outil fiable et paramétrable grâce à son noyau, offrant ainsi une infinité de formes possibles pour simuler divers filtres optiques. En nous appuyant sur notre base de données d'images obtenues à travers différents filtres optiques placés devant une mire à bord droit, nous pouvons directement exploiter leurs PSF mesurées, plutôt que de recourir à un modèle analytique simplifié (comme une gaussienne) pour les imiter. Cela permet de prendre en compte les caractéristiques réelles du filtre : forme asymétrique, lobes secondaires éventuels, profil de décroissance particulier. L'effet simulé ne reproduit donc pas uniquement l'intensité du flou, mais aussi ses attributs visuels spécifiques, comme la présence éventuelle de halos autour des hautes lumières. L'étape de convolution nécessite une attention particulière portée à la taille et à la forme du noyau utilisé. Dans notre cas, nous avons opté arbitrairement pour un noyau de 250 × 250 pixels, centré sur le pic maximal de la PSF. Cette taille relativement grande permet de ne pas tronquer certains comportements de la PSF, qui ont une intensité loin de leur centre. Ce sont précisément ces détails propres à chaque PSF qui déterminent la signature visuelle de la perte de netteté induite par chaque système optique. Enfin, nous normalisons systématiquement les noyaux de convolution afin de garantir que la luminance globale de l'image reste inchangée après traitement.

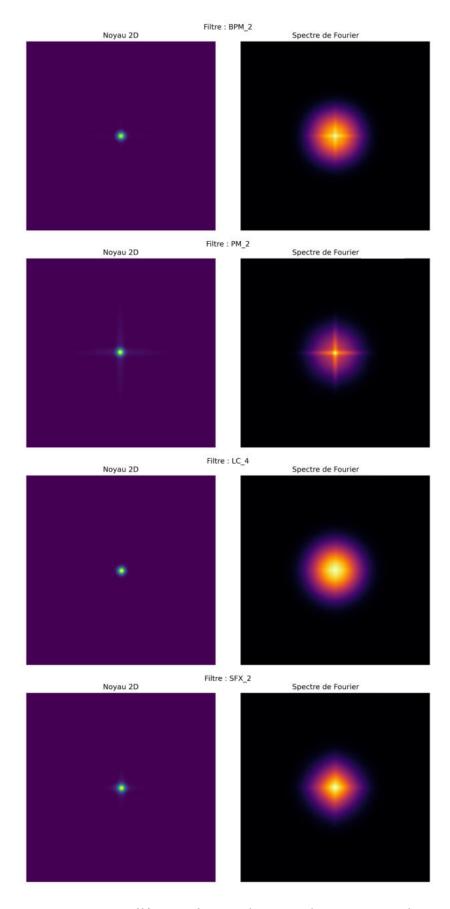


Figure 40 - Différentes formes de PSF et leurs spectres de

Fourier respectif pour la valeurs la plus élevée de filtre Black

ProMist, de ProMist, de Low Contrast et de SoftFX.

Le simple floutage obtenu par la convolution est ensuite modulé par une étape de recombinaison avec l'image nette. Cette approche, empirique mais justifiée par le fonctionnement optique des filtres, permet de contrôler la puissance apparente de l'effet. Nous avons vu dans la partie sur l'étude des caractéristiques optiques comment un filtre recombine deux images entre la lumière traversant les particules diffusantes et celle traversant uniquement le verre sans être affectée. Par exemple, dans le mélange de nos images numériques, on peut estimer retrouver l'effet visuel d'un Promist 2 en attribuant un poids de 60% de l'image finale à l'image convoluée par un noyau de Promist. Un poid de 10% correspondrait, lui, à un filtre 1/8. Cette échelle de modulation, simple à ajuster dans le code, constitue un outil pour adapter la force de l'effet et peut-être modulable sous la forme d'un slider si besoin. Ce réglage constitue un avantage non négligeable dans le choix entre filtre optique et filtre numérique puisqu'il n'est pas arrêté à des valeurs fixes et peut évoluer au cours du temps.



Figure 39 - Mélange de l'image convoluée et de l'image avant sa convolution (Dite de référence).

Méthodes de convolution : spatiale directe ou via Fast Fourier Transform

Dans notre traitement initial, la convolution est réalisée directement dans l'espace spatial. Ce procédé consiste à faire glisser le noyau sur l'ensemble de l'image et, pour chaque pixel, à calculer la somme des valeurs voisines selon les coefficients du noyau. Si cette méthode est simple à appliquer pour des noyaux de petite à moyenne taille, elle devient coûteuse pour l'algorithme en fonction des tailles de l'image et du noyau. Ainsi, pour un noyau de 150x150 pixels le temps de calcul devient rapidement conséquent, notamment pour des images de haute résolution. Afin de pallier ce problème, une alternative intéressante consiste à réaliser la convolution dans le domaine fréquentiel grâce à la Transformée de Fourier Rapide (FFT). Comme nous avons vu précédemment, le théorème de convolution établit qu'une convolution spatiale est équivalente à un produit dans le domaine de Fourier. Concrètement, la convolution de l'image par le noyau dans le domaine spatiale devient une multiplication de la TF de l'image par la TF du noyau dans le domaine fréquentiel. On repasse ensuite dans le domaine spatial en appliquant la TF inverse du résultat. Cette opération réduit énormément le nombre de calcul à faire puisqu'elle permet d'éviter de se retrouver avec une quantité d'opérations à réaliser proportionnelle au carré du nombre de pixels. Nous verrons plus tard que l'utilisation de la FFT pour la convolution est intéressante pour du traitement d'image mais qu'elle devient primordiale pour de la convolution sur du flux vidéo.

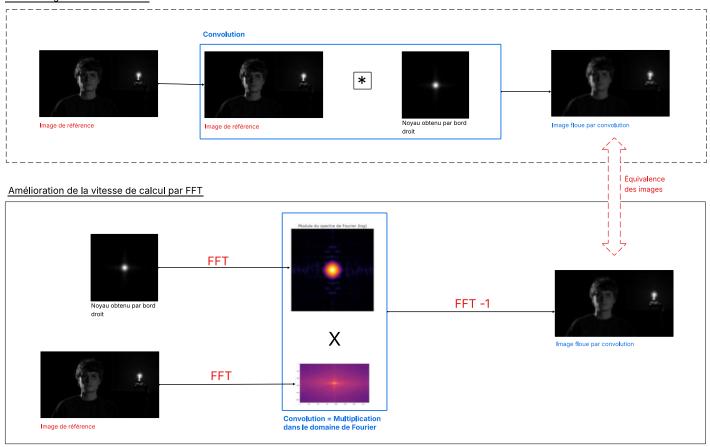
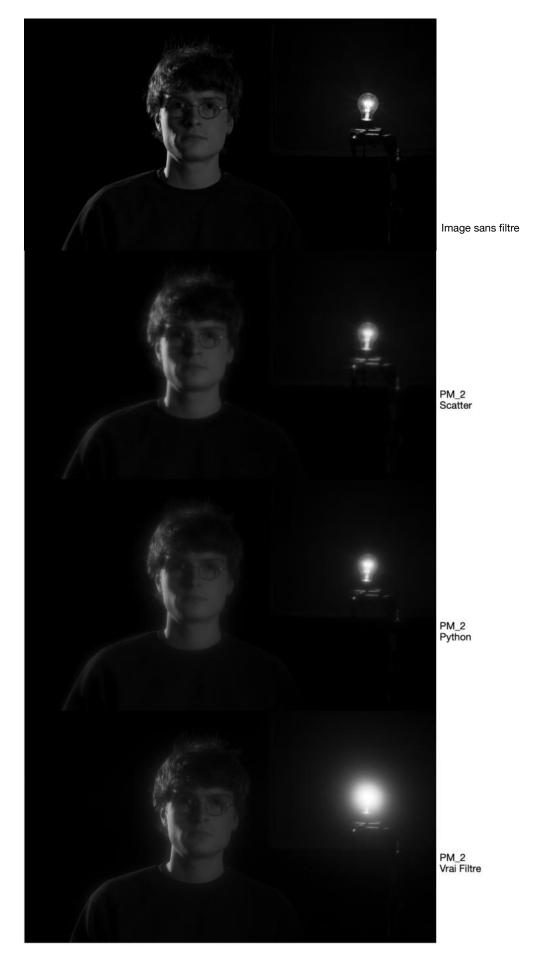


Figure 41 - Optimisation de la vitesse de calcul du programme via Fast Fourier Transform.

III.2. Observation des résultats

L'observation attentive des images issues de notre simulation numérique, ainsi que leur comparaison directe avec une version simulée par un Scatter numérique et avec une photographie réelle réalisée à l'aide d'un filtre optique ProMist 2, permet de mieux cerner les limites et les qualités de notre approche. Ces essais sur scène réelle montrent de manière évidente que certains phénomènes liés à la diffusion optique restent extrêmement difficiles à reproduire fidèlement par un traitement numérique.



<u>Figure 42 - Comparaison de rendu de simulation de diffusion et de véritable</u>
<u>diffusion.</u>

Gestion des très hautes lumières

Un premier élément particulièrement marquant concerne la gestion des très hautes lumières. Comme nous l'avions déjà souligné dans la partie dédiée à l'analyse optique des filtres, l'un des comportements caractéristiques des filtres physiques est sa capacité à générer, autour des très hautes lumières, un halo particulièrement intense. Même si l'intensité lumineuse dépasse la capacité du capteur à restituer une information (saturation), le halo grandit tout de même proportionnellement à la quantité de lumière que reçoit le filtre. Ce phénomène est impossible à simuler numériquement d'emblée. En effet, en traitement du signal numérique (que ce soit par la méthode de Scatter ou par notre propre code) lorsque le signal sature, il devient impossible de distinguer les variations d'intensité. Dans ce signal plafonné, la simulation reste incapable de discerner quelconque variation d'intensité. Alors qu'avec un filtre optique et dans les mêmes conditions d'expositions, le filtre offrira une diffusion toujours proportionnelle à la luminance reçu. Même si le capteur sature à la même valeur d'exposition, il enregistra quand même la taille du halo. Une des applications pour contrer cela serait de ponctuellement exagérer le halo sur des zones précises, dans une partie secondaire de notre étalonnage, ce qui rend le travail fastidieux.

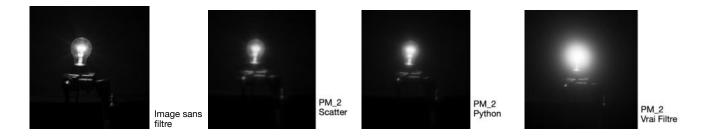


Figure 43 - Comparaison de rendu de simulation sur de très hautes lumières (à saturation du capteur).

Zones de transition

Au-delà de cet aspect lié aux hautes lumières, l'étude du rendu du filtre sur de vraies images éclaire également l'importance des choix techniques réalisés dans la construction de notre code. On observe que, pour obtenir une transition réaliste entre les zones très lumineuses et les zones plus sombres, la taille du noyau de convolution joue un rôle décisif. En effet, si le noyau utilisé est trop petit, le flou généré ne permet pas une diffusion suffisante et provoque un écrêtage du halo : les hautes lumières sont alors coupées de manière trop abrupte et on perd le dégradé naturel vers la partie sombre. La diffusion semble alors souffrir d'un défaut de propagation, comme si elle s'arrêtait brutalement à un certain rayon au lieu de se dissoudre progressivement dans l'arrière-plan. Ce phénomène, que l'on peut comparer à une sorte de « crop » involontaire du halo lumineux, est un indicateur clair que la construction du noyau doit respecter une taille suffisante pour englober tout l'étalement de la lumière. En choisissant un noyau de grande taille, couvrant largement la zone d'influence du flou, notre traitement permet de retrouver cette transition douce et étendue qui caractérise le rendu physique de la diffusion optique.

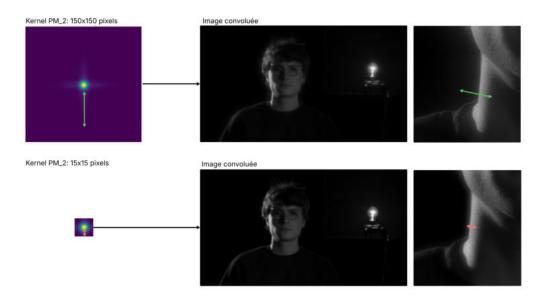


Figure 44 - Comparaison de rendu avec deux tailles de noyaux différents

(perte de l'effets avec un noyau trop petits).

Ajustement du rendu

Enfin, on constate que la technique de recombinaison entre l'image nette d'origine et son équivalent convolué s'avère particulièrement efficace pour ajuster le rendu de la diffusion. Elle permet de conserver un équilibre physique entre le rendu détaillé et l'effet de diffusion induit par le filtre. Dans ce code, nous avons choisi de moduler l'intensité de l'effet (entre 1/8, 1/4, 1/2, et 1) grâce à ce mélange entre l'image originale et son image convoluée. Bien que cette approche ne soit peut-être pas la plus rigoureusement réaliste sur le plan physique (il serait par exemple possible d'utiliser la PSF correspondant précisément au niveau du filtre souhaité) elle présente l'avantage pratique de partir d'une PSF très marquée (ici, celle d'un filtre de type Promist 2). Ensuite, en ajustant simplement le pourcentage de mélange entre l'image originale et l'image filtrée, on peut contrôler précisément la force de la diffusion sans avoir à recalculer une convolution avec un autre noyau.

IV - Intégration dans un Workflow

IV.1. Simulation de diffusion en direct

Pour appliquer la simulation de diffusion obtenue via notre programme Python dans un workflow concret, il devient pertinent d'étudier les possibilités de modification de l'image au sein d'un flux vidéo. De nombreux plug-ins et solutions de diffusion existent déjà en post-production, mais aucune ne semble être utilisée en temps réel. Les outils d'ajout de texture, tels que le grain ou la diffusion sont gourmands en ressources et donc rarement exploités sur le plateau. Leur utilisation induit en effet un décalage entre la captation à la caméra et l'affichage sur les moniteurs. Les solutions logicielles actuellement employées par les DIT pour modifier le flux d'image en direct reposent principalement sur des LUT Box, qui agissent comme de simples convertisseurs des valeurs de l'image. Des outils comme LiveGrade de Pomfort permettent uniquement des ajustements liés à la colorimétrie ou à la courbe de contraste (tous les paramètres compatibles avec une LUT). Ce type de modifications, que l'on peut assimiler à un étalonnage primaire, demande peu de ressources et garantit une latence minimale dans le flux vidéo. On comprend donc que sur un plateau le paramètre clé reste la latence. Toute altération de la stabilité ou de la qualité du signal va à l'encontre des missions du DIT, ce qui explique l'absence actuelle de solutions démocratisée permettant une utilisation en direct d'effets de texture. Malgré ces contraintes, il demeure intéressant de s'interroger sur les possibilités d'intégration de diffusion dans l'image en direct. Bien que les solutions existantes ne répondent pas encore aux exigences du village vidéo lors d'un tournage, l'évolution constante de la puissance des machines laisse entrevoir la faisabilité, dans un futur proche, d'une modification en temps réel de la texture de l'image.

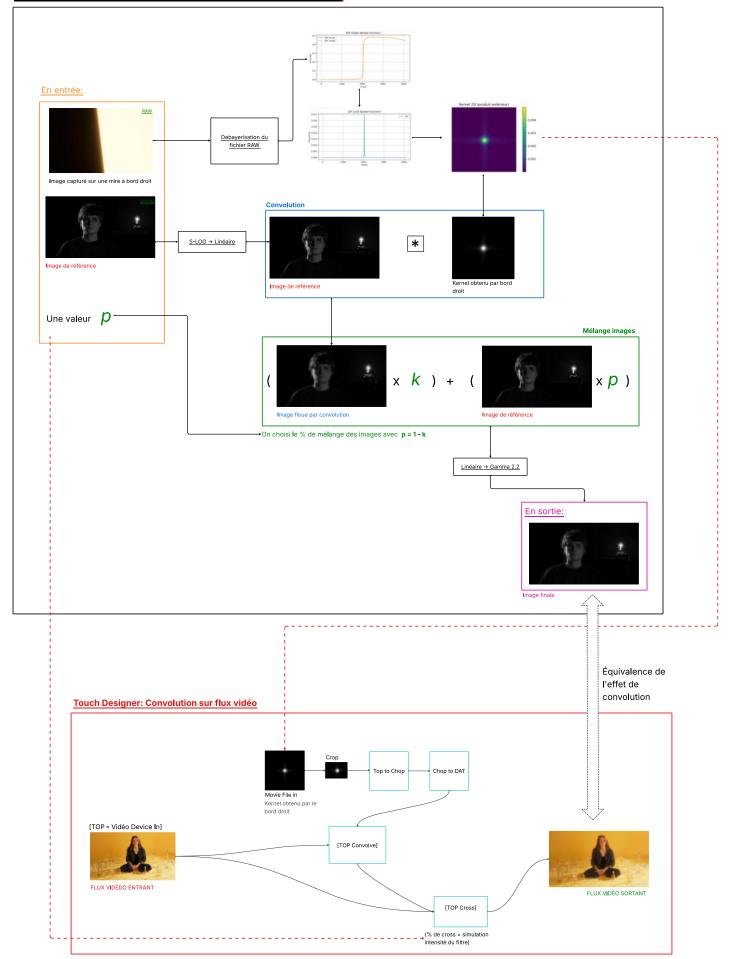


Figure 45 - Organigramme du projet TouchDesigner en parallèle du programme Python.

Dans le cadre de la partie pratique de mon mémoire, j'ai exercé la fonction de chef opérateur sur un documentaire tourné entièrement en studio. Les conditions maîtrisées de ce tournage ont permis de tester l'intégration d'un effet de diffusion sur un flux vidéo en direct. Le signal sortant en SDI (1920x1080 YPbPr)⁷ depuis la caméra Sony Venice a été converti en HDMI (via convertisseur SDI/HDMI Black Magic Design) afin d'être traité par un ordinateur (MacbookPro M2). Ce flux a ensuite été modifié à l'aide du logiciel de traitement d'image TouchDesigner pour simuler un diffusion, puis renvoyé vers un moniteur pour l'affichage. Les premières expérimentations menées via notre programme Python ont démontré la pertinence d'une convolution appliquée à l'image à l'aide d'un noyau spécifique. L'enjeu a donc été de transposer ce traitement à un contexte d'imagerie en temps réel. Dans l'optique de rester fidèle aux caractéristiques mesurés sur des filtres physiques, nous avons décidé d'exploiter les capacités de TouchDesigner pour appliquer la convolution directement sur le flux vidéo. Nous allons donc voir les critères ayant motivé ce choix de logiciel, ainsi que sur la mise en œuvre technique du traitement d'image à partir des noyaux de nos filtres optique préalablement définis.

_

⁷ Sony Corporation. (n.d.). Instruction Manual ILCE-7M3/ILCE-7M3K. https://www.sony.com/electronics/support/res/manuals/4735/d4d06ba1e126398ae780667a4317c8c9/47351091M.pdf

IV.1.1. - Gestion du flux vidéo

Choix du logiciel

Plusieurs solutions existent aujourd'hui pour modifier la texture d'une image en direct. L' une d'entre elles est Live Grade, proposé par le logiciel DaVinci Resolve. Cependant, cette option n'est pas la plus adaptée à notre programme de simulation de diffusion car DaVinci Resolve n'est pas conçu nativement pour le traitement de flux vidéo en temps réel ce qui limite la flexibilité nécessaire à la construction de l'effet de texture recherché. Nous nous tournons donc vers TouchDesigner, une alternative mieux adaptée à nos besoins. Ce logiciel offre une plus grande liberté dans la conception d'outils sur mesure grâce à une architecture entièrement pensée pour la gestion de flux vidéo en direct. Son fonctionnement est également plus proche de celui d'un langage de programmation ce qui le rend plus souple et performant dans notre cas d'usage. TouchDesigner, apparu en version bêta en 2008, est un environnement de programmation visuel basé sur un système de nœuds (nodes), à l'instar de la section Color de DaVinci Resolve ou du logiciel de VFX Maya. On peut le représenter comme une chaîne de traitement allant d'une entrée vidéo à une sortie d'affichage, chaque nœud situé entre les deux pouvant modifier le flux vidéo. Le fonctionnement global de TouchDesigner est qualifié de procédural, par opposition aux langages déclaratifs. L'utilisateur doit définir précisément les étapes à suivre pour obtenir un résultat, plutôt que de chercher à déclarer le résultat final. Cette logique oblige à penser en termes de processus : comment obtenir ce que je cherche, plutôt que quoi obtenir. De plus, chaque opération appliquée au flux reste visualisable indépendamment, ce qui permet une meilleure compréhension des effets à chaque étape du traitement.

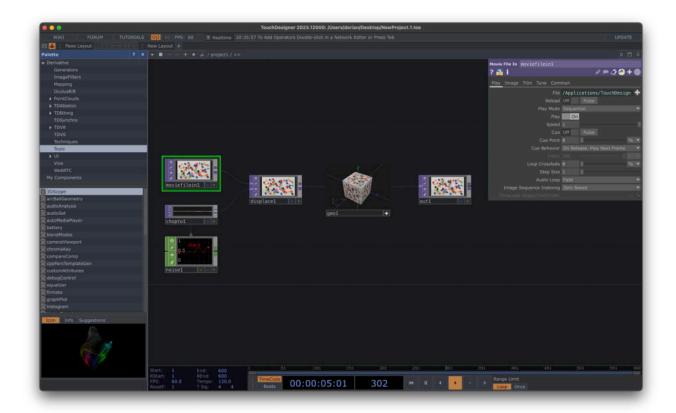


Figure 46 - Projet par défaut dans TouchDesigner (opérateur TOP et CHOP).

<u>Différents opérateurs</u>

Les opérateurs sont les éléments de base dans TouchDesigner. Chaque nœuds ajouté au projet correspond à une famille d'opérateurs spécifiques. Il existe six familles d'opérateurs (COMP, TOP, CHOP, SOP, MAT et DAT) dont seulement trois nous serons utiles pour ce projet.

• L'opérateur TOP permet de gérer les textures de l'image, leurs résolutions et tout opération propre à la gestion en 2D d'une image. La rapidité d'exécution des modifications de l'image apportée par cet opérateur dépend du GPU (Graphics Processing Unit) de la machine. Ce processeur est spécialisé dans l'exécution de nombreux calculs en parallèle. Il est particulièrement utilisé dans le traitement graphique et le traitement d'image en temps réel. Il dispose de sa propre mémoire vive (Random Access Memory)

dédié appelé VRAM (Video Random Access Memory). Ainsi, lorsqu'un flux vidéo est importé via cet opérateur, le processeur central (CPU) responsable de la coordination des calculs charge les images dans la RAM. Elles sont ensuite envoyées vers le GPU qui les stocke dans la VRAM et qui effectue les nombreux calculs du traitement de l'image en parallèle. Le résultat sera ensuite envoyé dans la sortie vidéo de la machine.

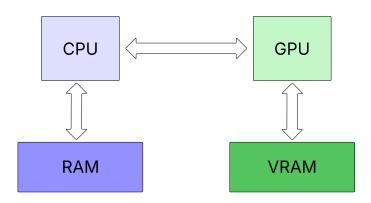


Figure 47 - Architecture de l'interaction CPU/GPU.

- L'opérateur CHOP est quant à lui spécialisé dans l'utilisation de canaux de valeurs numériques. Un canal numérique est une suite de valeurs numériques qui évolue dans le temps. Un canal d'entrée possible pour cet opérateur contient par exemple les valeurs dynamiques d'un fader via le protocole MIDI (Musical Instrument Digital Interface). Ce protocole permet de communiquer entre des instruments et des logiciels. La fader pourra ainsi communiquer avec TouchDesigner et faire varier les valeurs d'un canal de cet opérateur entre 0 et 1. Cet opérateur est ainsi au centre de la gestion de commandes et de périphériques dans un projet.
- L' opérateur DAT permet la gestion de données (DATA) sous diverses formes. Il peut à la fois contenir et modifier du texte, des tableaux (.csv) ou encore de données sous forme de texte comme le XML (eXtensible Markup Language) ou du (JSON JavaScript Object

Notation). Les valeurs de notre fader, pris en exemple plus tôt, pourraient ainsi être enregistrées sous la forme d'un fichier JSON ouvert ou modifiable par un opérateur DAT.

Les différents opérateurs, comparables à des fonctions issues d'une bibliothèque spécialisée dans le traitement de l'image, permettent une mise en place rapide et intuitive du programme que nous avons précédemment développé directement sur un flux vidéo. L'un des points forts majeurs du logiciel réside dans la visualisation instantanée de chaque modification à chaque nœuds du réseau. Ces caractéristiques en font un logiciel particulièrement intéressant dans les domaines comme le video mapping, les installations interactives, et les performances audiovisuelles en direct. TouchDesigner permet également d'intégrer des scripts en Python, ainsi que des shaders en GLSL (OpenGL Shading Language), un langage de bas niveau destiné au traitement graphique. Ces programmes sont intégrables directement dans un projet au travers d'un opérateur et peuvent s'exécuter sur le GPU, permettant de réaliser des effets en temps réel. Bien que nous n'exploitions pas cette fonctionnalité dans notre cas (les opérateurs de base couvrent déjà tous nos besoins actuels), l'intégration de GLSL ou Python constitue une perspective d'évolution notamment pour l'automatisation ou l'optimisation possible du projet.

IV.1.2. - Diffusion via TOP Bloom⁸

Une des solutions intéressante dans TouchDesigner pour simuler de la diffusion en direct est d'utiliser l'opérateur [TOP - Bloom]. Cet opérateur offre tous les paramètres nécessaires à la simulation de diffusion, en permettant un contrôle sur la valeur du signal à partir de laquelle la diffusion apparaît, l'étendue de la diffusion, ainsi que la manière dont celle-ci s'étend sur les zones non diffusées. Son utilisation reste cependant limitante car elle influe sur l'exposition de l'image et n'est pas construite sur de réelles mesures de filtres de diffusion. On en exclut donc son utilisation pour cette partie pratique de mémoire mais son fonctionnement reste pertinent à étudier pour comprendre les alternatives existantes à la convolution.



Figure 48 - Exemple de l'opérateur [TOP - Bloom].

Les trois premiers paramètres de cet opérateur constituent une étape de pré-traitement de l'image et permettent de selectionner les hautes lumières qui seront diffusées. On retrouve des paramètres courants de traitement de l'exposition de l'image, avec un Pre-Black Level (niveau de noir), Pre-Gamma (niveau de gris moyen) et Pre-Brightness (hautes lumières).

 $^{^8}$ Bloom TOP, TouchDesigner Documentation, $\underline{https://docs.derivative.ca/Bloom_TOP}$

Les paramètres suivant de cet opérateur s'appuient sur le fonctionnement du MIP mapping (Multum In Parvo). Cette opération de traitement de l'image consiste à créer une série d'images à partir de l'image originale. La définition d'une image (on parle alors de niveau de MIP map) est réduite d'un facteur deux par rapport à la précédente et devient donc de plus en plus « floue ». On obtient ainsi une pyramide d'images à la résolution décroissante.

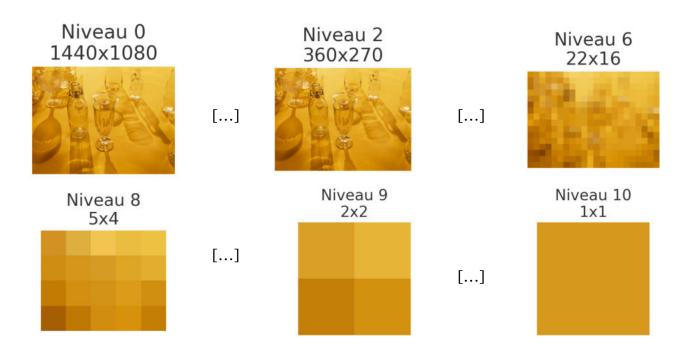


Figure 49 - MIP mapping d'une image sur 10 niveaux.

Plusieurs niveaux de MIP map seront ensuite sélectionnés, floutés puis combinés pour former l'image floue. Le paramètre Min Bloom Radius correspond au niveau d'image à la plus haute résolution de la MIP map à intégrer dans le mélange (on pourrait dire que c'est la limite haute, l'image la plus détaillée à inclure, par exemple le niveau 2). Le Max Bloom Radius correspond au niveau le plus « flou » à intégrer, c'est-à-dire à la résolution la plus basse (par exemple le niveau 7). En choisissant les limites haute et basse de cette pyramide de MIP map, on définit la manière dont l'effet de diffusion se disperse. Cette technique est largement utilisée dans le traitement des textures (en 2D comme en 3D), car elle est peu

coûteuse en calcul. Elle est notamment employée pour simuler la texture d'un objet qui s'éloigne dans un environnement virtuel.

Enfin, les paramètres Threshold, S-Curve, Fill et Intensity permettent d'augmenter, de réduire et de contrôler avec précision l'étalement de la diffusion. La documentation de TouchDesigner n'explicite pas le fonctionnement exact de ces paramètres, mais on peut émettre l'hypothèse qu'ils agissent sur l'intensité finale et sur la courbe de niveaux (gamma) de l'alpha généré. Cet opérateur est, au final, particulièrement intéressant dans son fonctionnement, car il permet de contrôler tous les paramètres nécessaires à la simulation de la diffusion. Toutefois, l'opérateur seul ne suffit pas à obtenir une image satisfaisante, car les réglages de pré-traitement modifient l'exposition de l'image. Après de nombreux essais, la solution la plus pertinente semble être de ne sortir de cet opérateur qu'un alpha, puis de le combiner via un opérateur TOP Screen à l'image originale.

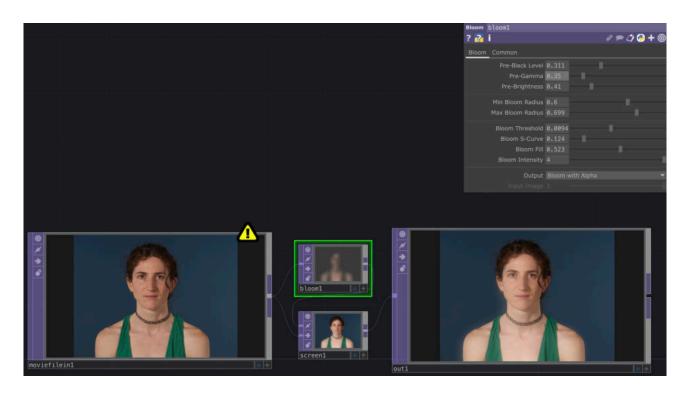


Figure 50 - Diffusion sur un flux vidéo via l'opérateur [TOP - Blom] et ses paramètres.

Une solution de diffusion pertinente consisterait à faire correspondre visuellement l'effet d'un filtre optique réel avec les paramètres de cet opérateur, puis à sauvegarder ces réglages. Il serait alors facile de passer d'un effet de filtre à un autre en sélectionnant simplement des paramètres prédéfinis. C'est dans ce contexte que l'utilisation de la programmation en GLSL pourrait s'avérer utile pour un développement futur du projet.

IV.1.3. - Outils de diffusion pour un flux vidéo

L'opérateur Bloom ne permettant pas de simuler un phénomène de diffusion à partir de données mesurables issues d'un filtre optique, nous avons choisi de le laisser de côté pour nous concentrer sur la convolution dont nous avons déjà pu vérifier l'efficacité lors de notre programme en Python. Pour essayer de se rapprocher des effets de diffusion produits par des filtres optiques existants, il devient pertinent d'adapter notre code sous la forme d'une suite d'autres opérateurs dans TouchDesigner. Nous partons des différents noyaux de filtres de diffusion déterminés précédemment (Pro-Mist, Black Pro-Mist, SoftFX, Low Contrast), et allons effectuer la convolution directement dans le projet TouchDesigner. Celui-ci se compose de deux entrées principales (voir <u>figure 51</u>). La première est le noyau correspondant au filtre optique choisi, exporté depuis le programme Python sous forme d'image JPEG (de résolution arbitraire 250x250). Cette image est intégrée au projet grâce à l'opérateur [TOP - Movie File In], qui permet de charger des images. Un traitement est ensuite appliqué via l'opérateur [TOP - Crop], qui permet de redimensionner l'image, soit en la rognant (cropping), soit en réduisant sa résolution. Cette étape est importante car la taille du noyau utilisé pour la convolution est le principal facteur influençant la vitesse d'exécution. Une résolution trop élevée entraîne des temps de calcul plus longs, ce qui provoque une latence dans le flux vidéo. Deux opérateurs intermédiaires assurent la

conversion de l'image du noyau vers un format exploitable par l'opérateur de convolution. Celui-ci ne prend en entrée que des valeurs sous forme de tableau. On utilise donc un opérateur [CHOP] pour transformer l'image en canaux de valeurs numériques, puis un opérateur [DAT] pour stocker ces valeurs sous forme de tableau.

La deuxième entrée du projet est le flux vidéo, obtenu grâce à l'opérateur [TOP - Video Device In]. Ce flux est ensuite transmis à l'opérateur [TOP - Convolve], qui applique la convolution à l'aide du noyau précédemment converti. Le résultat est ensuite combiné avec le flux vidéo original via l'opérateur [TOP - Cross]. Le paramètre de mélange (Cross_value) est crucial car il détermine la quantité de diffusion appliquée. Le mélange des deux images se fait selon la formule suivante explicitée dans la documentation technique de TouchDesigner et qui s'avère identique à celle utilisée dans le programme Python: Output = Input1 × (1 - Cross_value) + Input2 × Cross_value. Enfin, l'opérateur [TOP - Out] permet de faire sortir le flux vidéo traité vers l'affichage.

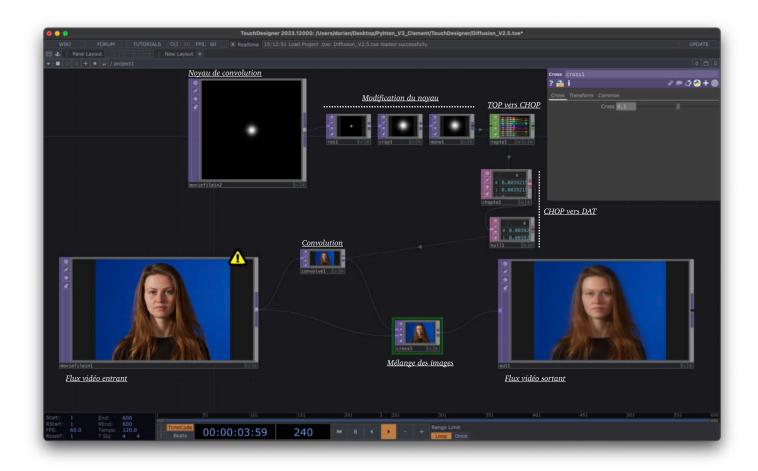


Figure 51 - Projet de simulation de diffusion dans TouchDesigner.

Amélioration des performances de calcul

Comme nous l'avons vu, la latence constitue un enjeu central dans le traitement d'image en direct. Il est donc essentiel de s'interroger sur les moyens d'optimiser les performances de calcul. Cependant, il reste difficile d'estimer avec précision la latence totale induite par le traitement d'image dans TouchDesigner, car celle-ci dépend à la fois de l'ensemble de la chaîne de traitement et, surtout, des capacités du GPU de la machine. Une évaluation complète de la latence nécessiterait une prise en compte de l'intégralité du pipeline et non uniquement du traitement logiciel. Afin de limiter au maximum la latence engendrée par le traitement d'image, plusieurs améliorations du projet peuvent être envisagées. Comme nous l'avons vu, la taille du noyau impacte directement la rapidité d'exécution. Comme dans tout système, il s'agit de trouver un compromis entre la qualité du rendu et la vitesse de traitement. L'opérateur [TOP - Crop] est particulièrement utile dans ce contexte, puisqu'il

permet de réduire la résolution de l'image en sortie du nœud. Cela offre la possibilité d'ajuster dynamiquement la taille du noyau pour maintenir des performances acceptables. Par exemple, dans notre cas arbitraire d'un noyau de 250x250 pixels, il est envisageable de réaliser la convolution sans réduire la résolution. Cependant, la capacité à traiter de grands noyaux dépend directement de la puissance du GPU. TouchDesigner alerte rapidement l'utilisateur via l'opérateur de convolution si la charge de calcul dépasse les capacités du GPU.

Une autre optimisation évoquée précédemment consiste à effectuer la convolution dans le domaine fréquentiel. En effet, une convolution spatiale peut être réalisée plus efficacement via une multiplication dans le domaine fréquentiel. En combinant des opérateurs de FFT, de multiplication et de FFT ^ -1, il serait possible d'obtenir un résultat visuellement équivalent tout en réduisant significativement la charge de calcul.

Enfin, la solution la plus radicale mais potentiellement la plus efficace pour accélérer le traitement consisterait à adopter une méthode inspirée du MIP mapping ou d'un système d'assemblage d'images floues ou à basse résolution. Contrairement à la convolution (qu'elle soit spatiale ou fréquentielle), qui reste une opération coûteuse, additionner plusieurs images à différentes résolutions est moins exigeant en ressources. Cependant, cette solution ne permet pas de simuler précisément l'effet d'un filtre optique réel à partir de son noyau de convolution mesuré. Elle reste donc une solution pertinente mais ne permet pas de constituer une base de données rigoureuse d'effets de filtres de diffusion. C'est sur ce constat que s'appuie le moteur de rendu 3D Unreal Engine qui, comme nous le verrons plus loin, propose ces deux méthodes en fonction des exigences de qualité de rendu ou de performance d'exécution.

Conclusion de l'outil de simulation

Finalement, après plusieurs tests menés au cours de cette partie pratique de mémoire, j'ai pu éprouver mon propre système de simulation de diffusion basé sur des noyaux de filtres optiques appliqués en temps réel sur un flux vidéo. Les différents noyaux de convolution permettent d'émuler plusieurs types de filtres, et l'opérateur de convolution, associé à un réglage de mélange entre l'image originale et l'image convoluée, offre un contrôle sur l'intensité de la diffusion.

Cette technique est cependant loin d'être parfaite et plusieurs piste reste à améliorer. Le rendu des hautes lumières, en particulier, reste problématique : les halos générés dans les zones très lumineuses ne sont pas pleinement satisfaisants car ils ne sont pas proportionnels à l'intensité réelle de la lumière, contrairement à ce que produisent les filtres physiques. Une piste d'amélioration pourrait consister à renforcer la diffusion uniquement dans les zones les plus lumineuses, via une séléction des hautes lumières. Cependant, sur un flux vidéo en direct, la dynamique limitée du signal en sortie caméra tend à écraser les hautes lumières, rendant difficile de les discerner et leur appliquer un traitement spécifique. Comme nous le verrons plus loin, cette difficulté est également présente dans les émulations de diffusion en postproduction, bien que celles-ci disposent généralement d'un signal plus riche, ce qui facilite le traitement. Ce problème est en revanche bien mieux maîtrisé dans les environnements 3D, où la convolution s'applique sur une scène artificielle disposant d'une dynamique potentiellement très étendue.9

Une autre piste d'amélioration concerne le noyau de convolution lui-même, qui détermine la subtilité du rendu. Les noyaux actuels présentent parfois des variations discrètes, rendant difficile l'évaluation de leur efficacité. Il est difficile de savoir si cela résulte d'un manque de détails dans l'extraction des noyaux ou si cela reflète simplement d'une finesse des effets

⁹ Voir comparaison en annexe.

produits par les filtres physiques. En l'absence de méthode de comparaison objective, ces évaluations reposent principalement sur des jugements visuels. Une solution serait de développer un protocole de test sur mires, permettant de comparer les effets pixel par pixel entre une simulation et un vrai filtre physique.

Cependant, cette installation constitue une solution pertinente pour la prévisualisation de la diffusion, sans recours à un filtre physique. Bien que le traitement soit effectué sur une image en résolution réduite (le flux traité sortant en HD seulement depuis la Sony Venice), il permet un ajustement visuel en temps réel, avec des résultats globalement satisfaisants. Les principales contraintes résident dans l'organisation du dispositif, qui nécessite la présence d'un DIT pour contrôler l'image et gérer le matériel. La latence induite par le traitement, quoique non négligeable, reste acceptable en vue de la complexité de l'effet simulé.

IV.2. État des lieux de la simulation de texture dans un workflow actuel

Les enjeux liés à la simulation de diffusion s'inscrivent dans des problématiques plus larges autour de la texture d'image. Après des échanges avec des étalonneurs, un laboratoire, des DIT et des chefs opérateurs, plusieurs pratiques émergent avec l'apparition de nouveaux outils de simulation de texture. L'arrivée sur le marché du logiciels à bas coût DaVinci Resolve, ainsi que la possibilité de coder ses propres plug-ins (DCTL), semble avoir ouvert de nouvelles perspectives. De nombreuses entreprises, déjà engagées dans la tendance actuelle de simulation de pellicule (grain, colorimétrie), s'intéressent désormais à la simulation de diffusion optique tout en restant minoritaire dans leur recherche et développement.

IV.2.1. - En production

Étalonnage « on-set »

Eun des axes de réflexion qui anime ce travail de recherche consiste à proposer une méthode de simulation de filtre de diffusion, tout en envisageant son intégration dans un flux vidéo en direct. Comme nous l'avons vu, la solution TouchDesigner apparaît comme la plus adaptée à cet usage. Cependant, son emploi reste marginal parmi les DIT sur les plateaux de tournage. En effet, les workflows actuels d'étalonnage «on-set» privilégient avant tout les ajustements colorimétriques dans un souci d'efficacité, de non-altération du signal, et surtout de réduction maximale du délai entre la caméra et les moniteurs. Comme mentionné précédemment, la solution LiveGrade, développée par l'entreprise Pomfort, semble aujourd'hui la plus implantée. Ce logiciel communique en temps réel avec une LUTBox placée entre la caméra et les moniteurs (voir figure 52). Il permet ainsi de modifier en direct la LUT d'affichage des moniteurs, tout en enregistrant ces modifications sous forme de CDL (Color Decision List), facilitant leur transfert vers la post-production ou vers

les logiciels de transcodage des proxys. Le pipeline majoritairement utilisé sur les roulantes DIT ne semble pas à ce jour conçu pour intégrer un affichage de texture, même s'il peut être adapté selon les projets ou les demandes spécifiques d'un film. De plus, le transcodage des rushes pour la création de proxys destinés au montage ou aux dailies, souvent pris en charge par les DIT, tend à écarter les questions de texture au profit de la rapidité d'exécution. Intégrer des modifications de texture à ce stade impliquerait en effet des temps de transcodage plus longs et une charge accrue sur les ressources machines. Cette étape est donc généralement confiée aux laboratoires, qui disposent du temps et des ressources nécessaires pour effectuer ce travail en profondeur, mais cela engendre des coûts supplémentaires, notamment en fonction du poids des fichiers et des durées de traitement. Finalement, sauf exception, les considérations liées à la texture ne constituent pas une priorité lors de l'étalonnage «on-set». Le développement approfondi du look par le biais de la texture reste, dans la majorité des cas, réservé à la post-production.

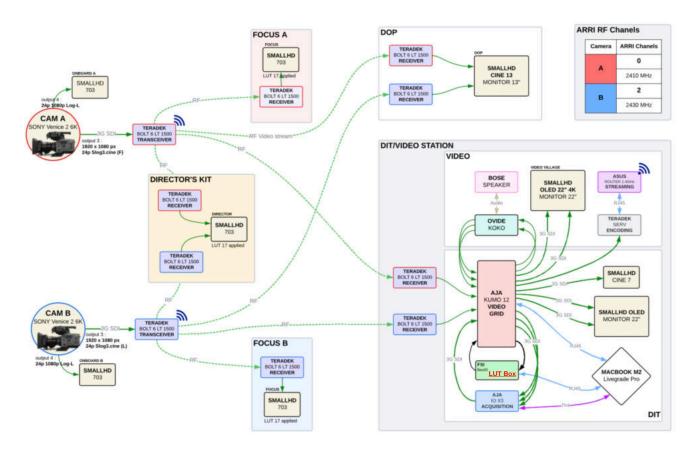


Figure 52 - Synoptique du flux vidéo de la caméra au moniteur pour de l'étalonnage « on-set »

(schéma de Brice Barbier).

On remarque la LUT Box qui permet l'application des corrections colorimétriques en direct sur l'image pour un affichage sur les moniteurs.

Utilisation des filtres

La simulation numérique de la diffusion reste aujourd'hui marginale par rapport aux pratiques dominantes dans les productions actuelles. La location de filtres de diffusion auprès des loueurs de caméras demeure courante, et bien que les principaux fabricants sortent rarement de nouveaux modèles, ces filtres figurent encore régulièrement sur les listes caméra. Cependant, avec l'émergence d'outils de simulation de diffusion en post-production, certains chefs opérateurs commencent à s'y intéresser de plus en plus activement. Une pratique intéressante consiste à utiliser un filtre de diffusion à faible densité sur le tournage, puis à renforcer l'effet en postproduction. Cette approche permet de conserver une certaine flexibilité en évitant de figer une diffusion trop forte dès le

plateau. Hazem Berrabah (chef opérateur, AFC, TSC) n'hésite pas à recourir à ce type de simulation lorsqu'un plan nécessite de retirer temporairement le filtre optique, notamment dans un contexte de VFX, où la diffusion peut nuire à l'intégration des effets. Il sait alors qu'il pourra retrouver une diffusion cohérente en prenant le temps de la faire correspondre au reste du film lors de l'étalonnage. Il me confie néanmoins préférer, dans la mesure du possible, conserver un véritable filtre sur l'ensemble du tournage, car cela permet de garantir une cohérence esthétique globale. Il est difficile d'établir une règle générale quant à l'utilisation des filtres, chaque projet ayant ses propres spécificités et chaque chef opérateur apportant son savoir-faire et sa sensibilité.

IV.2.2. - En post-production

Plusieurs solutions de simulation de diffusion existent en post-production, généralement sous forme d'extensions intégrées aux logiciels d'étalonnage tels que DaVinci Resolve ou Baselight. Si leur usage reste limité lors de la phase de production, ces outils trouvent une place de plus en plus importante dans la création du look d'un film en amont du tournage ou lors de l'étalonnage final.

Scatter

Parmi les outils les plus répandus, on retrouve Scatter que nous avons déjà évoqué. Ce plugin, compatible avec les deux principaux logiciels d'étalonnage, propose un vaste choix de simulations de filtres de diffusion et s'intègre dans divers espaces colorimétriques (dont ACES). La communication de la marque met en avant la fidélité de ses simulations, ce qui peut s'avérer séduisant. Cependant les expériences de simulation menée dans le cadre de ce mémoire révèlent certaines limites. Il semble que les simulations numériques rencontrent encore des difficultés à reproduire avec fidélité les effets de diffusion dans les zones de très hautes lumières. Comme nous l'avons vu précédemment, les capteurs atteignent un plafond de saturation (H saturation) et ne différencient plus les niveaux de luminance au-delà d'un certain seuil. Alors qu'un filtre physique continue d'augmenter le halo proportionnellement à l'intensité de la source lumineuse, une simulation numérique reste contrainte par les informations enregistrées par le capteur. Malgré ces limites, Scatter demeure un outil assez pratique et suffisamment souple pour s'adapter à différentes recherches de texture. Scatter étant un produit commercial avant tout, aucune information sur son fonctionnement n'existe. Suite aux différentes expérimentations réalisées en Python et sur TouchDesigner, on peut émettre l'hypothèse que la valeur d'intensité dans Scatter agit sur le ratio de combinaison entre l'image d'origine et sa version altérée par un flou. Les paramètres du flou, quant à eux, sont propres à chaque filtre simulé sous forme de preset, en modulant notamment le niveau de diffusion pour imiter les caractéristiques spécifiques du filtre physique correspondant.

L'étalonneur Arthur Paux a eu l'occasion de travailler à plusieurs reprises avec Scatter et en fait un retour globalement positif. Sans chercher nécessairement à reproduire un filtre physique précis, il y trouve un outil intéressant pour explorer des textures, en particulier dans certains projets où la diffusion fait partie d'un look global pensé en amont. Il nuance toutefois son usage selon les contextes. Par exemple, sur le film Emilia Pérez, il avait développé avec le chef opérateur Paul Guilhaume un look intégrant Scatter en amont du projet dès les essais. Pourtant, lors de l'étalonnage final, son emploi s'est avéré plus limité que prévu. Le rendu parfois peu convaincant dans les très hautes lumières, notamment sur des sources dans le champ ou sur certains effets de compositing avec des jeux de profondeur ont réduit son utilisation. Il rappelle alors que le travail de simulation de diffusion dépend profondément du type de projet et de la facilité à l'intégrer dans un workflow global. Ce type de traitement peut s'avérer long à paramétrer et nécessite parfois des ajustements plan par plan, ce qui le rend difficilement compatible avec les délais serrés de l'étalonnage en long métrage.

<u>Diaphanie</u>

Le plug-in Diaphanie, développé par Paul Maurin, Martin Roux et Olivier Patron est un outil de création de look spécialisé dans la génération de texture. Accompagné de sa version Diachromie, orientée vers la recherche colorimétrique de looks, ils ont récemment été intégrés au laboratoire de post-production Poly Son au sein de leur département de recherche et développement HAL. À l'intérieur du plug-in, un module de diffusion (encore en cours d'amélioration) permet déjà d'agir sur plusieurs paramètres de simulation. Contrairement à Scatter, qui cherche à reproduire des filtres de diffusion existants, Diaphanie propose un contrôle sur plusieurs éléments principaux pour simuler la diffusion. On y retrouve un paramètre de la taille de l'étalement (radius), de l'intensité de la diffusion (strength), ainsi que du niveau de mélange entre l'image diffusée et l'image d'origine (blend spread). Son fonctionnement se base un système proche des MIP maps : la Pyramide de Laplace. La construction de cette autre représentation multi-échelle de l'image se base sur un flou gaussien appliqué à chaque niveau de la pyramide. À chaque étape, l'image est floutée via un flou gaussien et réduite en résolution (sa taille en pixels est divisée souvent par deux en hauteur et en largeur). Cette version floutée et réduite est ensuite remise à la taille d'origine, puis soustraite de l'image initiale à ce niveau. On peut ainsi isoler uniquement les détails fins perdus lors de la réduction. En empilant les différents niveaux, on obtient une représentation complète de l'image. La sélection de modification par niveau permet ainsi de modifier l'effet de diffusion. Ce plug-in constitue un outil à la fois modulable et instinctif pour simuler de la diffusion.

Baselight propose son propre effet de diffusion (Dfuse) qui offre des contrôles simples mais fonctionnels au travers uniquement de trois paramètres. Plusieurs autres plug-ins et DCTL circulent aussi en ligne, mais restent pour l'instant relativement anecdotiques dans le paysage de la post-production française. Ces solutions de diffusion offrent ainsi de

nombreuses possibilités à l'étalonnage et, contrairement aux filtres physiques, peuvent être manipulées comme de véritables outils d'étalonnage : appliquées uniquement à certaines zones de l'image ou encore animées au cours d'un plan. Cependant, ces options sont particulièrement chronophages. D'après son expérience, Arthur Paux considère ces outils davantage comme des éléments à intégrer dès la phase de développement du look, en amont, afin d'assurer une certaine fluidité lors de la phase d'étalonnage final, souvent contrainte par des délais très serrés.

IV.2.3. - Enjeux annexes

Rendu 3D

Les développeurs d'environnements 3D se sont rapidement appropriés cette fonctionnalité pour chercher à simuler un environnement réaliste et accentuer la sensation d'éblouissement ou de forte luminosité. Dans leurs travaux visant à améliorer cette technique, la société de développement de jeux vidéo Sledgehammer Games présente, lors d'une conférence en 2014 ¹⁰, le fonctionnement de leur système de diffusion pour la sortie de leur dernière production Call of Duty. Ils parviennent, grâce au système de textures MIP mapping, à réduire la résolution de l'image (downscaling), puis à l'augmenter (upscaling) jusqu'à la taille de l'image originale. En additionnant tous ces niveaux de MIP maps, ils réussissent ainsi à recréer une diffusion plus convaincante.

10 limener I (n d) Next-Generation Post-Processing in Call of Duty: Advanced Wo

¹⁰ Jimenez, J. (n.d.). Next-Generation Post-Processing in Call of Duty: Advanced Warfare. Iñigo Quilez / Iryoku. https://www.iryoku.com/next-generation-post-processing-in-call-of-duty-advanced-warfare/

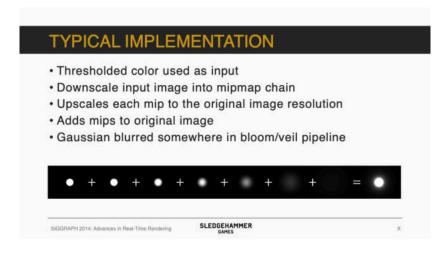
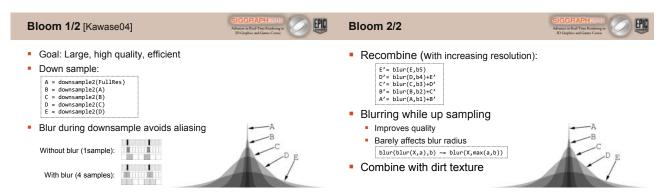


Figure 53 - Diapositive de l'implémentation de la diffusion par Sledghammer.

Unreal Engine (le systeme de rendu 3D) marque la deuxième évolution de la simulation de diffusion en proposant dans un premier temps un modèle de MIP mapping presque similaire mais en appliquant un flou gaussien à chaque niveau de MIP mapping, leur offrant plus de choix dans la forme de la diffusion.

Au fur et à mesure des évolutions, Unreal Engine se perfectionne et propose désormais, dans sa version la plus récente (5.5), la diffusion par convolution d'un noyau, tout en s'assurant de la fluidité du système exécutant la convolution dans le domaine fréquenciel via une FFT. Le moteur 3D va même plus loin et permet d'importer son propre noyau de convolution pour générer des diffusions particulières. Ils font d'ailleurs le même constat d'une perte de rapidité de calcul en passant par la convolution plutôt que par une chaîne MIP map. Ils conseillent donc plutôt le MIP map pour les jeux en ligne qui nécessitent une vitesse d'exécution élevée et conseillent la convolution pour des traitements plus lourds: « La Convolution de flou lumineux est conçue pour être utilisée avec des cinématiques en jeu ou hors ligne ou sur du matériel haut de gamme, tandis que le flou lumineux Standard devrait être utilisé pour la plupart des applications de jeu. En évaluant le compromis, le flou lumineux Standard présente un avantage significatif en termes de

performance, mais il n'est pas conservateur (il peut entraîner un éclaircissement général de l'image) et il n'a pas la complexité visuelle de la Convolution de flou lumineux. »¹¹.



Phase 1 – Downsampling flouté (de A à E) :

- A = Image d'origine en pleine résolution.
- B à E = Images de plus en plus réduites (downsample2), avec flou appliqué à chaque étape pour éviter l'aliasing.
- Without blur : réduction brutale → effets d'escalier.
- With blur: réduction douce avec moyenne de plusieurs pixels → transitions visuelles plus lisses.

Phase 2 – Upsampling + Recombinaison (de E' à A') :

• Chaque niveau est flouté puis ajouté au niveau supérieur :

 Cela produit un halo lumineux progressif autour des zones claires.

Figure 54 - Diapositive de la première version de diffusion d'Unreal Engine (2012).

¹¹ Epic Games. (n.d.). Bloom in Unreal Engine (v5.5). Unreal Engine Documentation. https://dev.epicgames.com/documentation/fr-fr/unreal-engine/bloom-in-unreal-engine?application_version=5.5

HDR

La High Dynamic Range (HDR) désigne l'ensemble des techniques permettant la captation et la restitution d'une scène à fort contraste. Elle englobe à la fois le système de captation, qui doit pouvoir enregistrer une dynamique étendue, et le système de restitution, qui doit être capable de la restituer fidèlement. On parle souvent d'une capacité maximale d'affichage autour de 100 cd/m² pour le SDR (Standard Dynamic Range) et de 1 000 cd/m² pour le HDR. Un film peut alors avoir un master HDR pour une diffusion sur téléviseur HDR (par exemple sur les plateformes), et un master SDR pour la salle de cinéma. Une attention particulière doit alors être portée par le chef opérateur, l'étalonneur et le laboratoire pour s'assurer que les masters HDR et SDR respectent les intentions visuelles du film. La possibilité d'afficher les très hautes lumières offerte par le HDR peut sembler, à première vue, un avantage dans la gestion de la simulation de diffusion. Le fait de pouvoir afficher les zones spéculaires et d'appliquer l'effet de diffusion uniquement à celles-ci permet en effet de se rapprocher du rendu d'une vraie diffusion optique. Cependant, si le HDR permet d'afficher des lumières très intenses, il ne constitue pas pour autant un choix par défaut. Il peut être souhaitable de limiter volontairement la dynamique d'un film à une plage plus restreinte que celle autorisée par le HDR. Il s'agit là d'un choix purement artistique, défini au moment de l'étalonnage. Ainsi, utiliser toute la dynamique lumineuse d'une image pour y appliquer une simulation de diffusion dans les hautes lumières, avant de réduire ensuite ces hautes lumières pour s'adapter à l'étalonnage final peut s'avérer fastidieux. Ces opérations de sélection des très hautes lumières et d'application ciblée de la diffusion ne sont pas en adéquation avec la réalité des délais courts de post-production. De plus, la création d'un master SDR à partir d'un master HDR, ou inversement, complexifie les enjeux liés à ce type de texture appliquée aux hautes lumières. Il serait donc pertinent de pousser les recherches dans ce domaine, notamment en prenant en compte le fonctionnement des systèmes de conversion HDR/SDR tels que Dolby Vision, souvent utilisés en laboratoire.

Conclusion et perspectives

Lors de la création d'une image pour le cinéma, le phénomène de diffusion s'inscrit dans le vaste spectre de ce que l'on appelle la texture. Elle est très souvent utilisée avec subtilité surtout à l'heure des hautes résolutions d'affichage. Au fil de la rédaction de ce mémoire et des échanges avec celles et ceux qui construisent l'image, j'ai constaté que la diffusion, dans l'élaboration du look, ne tient généralement pas une place centrale. Elle reste pourtant largement employée, mais toujours au travers de filtres optiques. Les outils techniques actuels ne permettent pas encore d'envisager ce paramètre textural avec la même souplesse que celle que nous avons aujourd'hui avec la couleur. Il manque une continuité logique qui permettrait un suivi de la texture tout au long d'un projet, comme les LUT ont pu en apporter pour la cohérence colorimétrique. Ce mémoire a été l'occasion d'explorer les possibilités d'une texture générée en direct. Mais il apparaît clairement qu'une intégration plus globale au sein des workflows, aussi bien logiciels que matériels, serait nécessaire pour permettre à la fois une prévisualisation fiable et une conservation des informations texturelles tout au long de la chaîne de création de l'image. Les solutions proposées par TouchDesigner se sont révélées intéressantes et cohérentes mais restent limitées par la latence et leurs précisions.

Nous avons fait le choix, dans ce mémoire, de simuler la diffusion en nous appuyant sur des mesures réelles de filtres optiques. Ce choix répondait à la volonté d'approcher les phénomènes physiques et d'explorer la jonction entre physique et traitement d'image numérique. S'approcher au plus près des caractéristiques des filtres réels permet également de bénéficier d'une référence visuelle claire, offrant une meilleure compréhension des intentions des fabricants ainsi que des choix esthétiques possibles. Les résultats de l'émulation se sont montrés satisfaisants avec cependant plusieurs pistes d'améliorations. Comme cela a été constaté à plusieurs reprises au fil de ce travail, le comportement des hautes lumières à la limite de saturation du capteur reste une difficulté majeure dans toutes les simulations actuelles. De plus, les différences entre les filtres restent souvent subtiles et plusieurs parametres sont nécessaires pour contrôler tous les modèles de diffusion: perte de contraste global, adoucissement du rendu des détails, halos dans les hautes lumières.

Ainsi, partir de filtres optiques réels n'était pas la seule voie possible dans cette démarche de simulation. Le choix commercial de Scatter, qui repose sur une bibliothèque de presets calqués sur des modèles de filtres existants se comprend dans une logique d'accessibilité. Mais à mon sens, s'éloigner de la reproduction fidèle des modèles de fabricants pourrait offrir aussi une grande liberté dans la création de l'image. Une approche fondée sur une interprétation plus globale des effets de la diffusion (avec une recherche de rendu plaisant plutôt que strictement fidèle) aurait conduit à un outil différent, mais tout aussi pertinent dans un but de création d'image. Ce choix soulève une question plus large sur le rôle de l'émulation pour des outils d'étalonnages: s'agit-il de simuler précisément une réalité physique ou bien de produire des outils d'exploration plus adaptés aux détournements et à l'expérimentation? En définitive, ce mémoire propose un aperçu des nombreux enjeux liés à la texture dans l'image et montre que les outils du traitement d'image sont accessibles et offrent une grande liberté de manipulation.

Bibliographie

Ouvrages

- RAY Sidney F., Applied Photographic Optics: Lenses and Optical Systems for Photography, Film, Video, and Electronic Imaging, Oxford, Focal Press, 2002 (3rd edition)
- GASQUET Claude & WITOMSKI Patrick, Analyse de Fourier et applications : filtrage, calcul numérique, ondelettes, Paris, Masson, 2010
- MAILLET Jean-Claude, Filtres et diffuseurs : technologie et usage, Paris, Thélème, 1976
- WESTON Chris, Filtres optiques et numériques pour la photo : techniques, savoirfaire et défis créatifs, Paris, Dunod, 2010 (traduit de Mastering Filters for Photography par Claire Riou)
- MILLOT Laurent, *Traitement du signal audiovisuel : applications avec Pure Data*, Paris, Dunod / ENS Louis-Lumière, 2008
- BELLAÏCHE Philippe, Les secrets de l'image vidéo : colorimétrie, éclairage, objectif, caméra, signal vidéo, compression numérique, formats d'enregistrement, Paris, Eyrolles, 2000 (3e édition)
- HOLBEN Jay & PROBST Christopher, *The Cine Lens Manual*, Los Angeles, Adakin Press, 2022
- STUMP David, Digital Cinematography: Fundamentals, Tools, Techniques, and Workflows, Burlington (MA), Focal Press, 2014
- BURUM Stephen H. (éd.), *American Cinematographer Manual*, Hollywood (CA), American Society of Cinematographers, 2007 (9e édition)

Travaux de recherche

- BAUDELET Basile, *L'usage des filtres diffuseurs et leurs enjeux esthétiques*, mémoire de master, dirigé par Pascal Martin, ENS Louis-Lumière, 2018
- MONTMEA Clément, Étude de la texture du film : Grain, Halation et Rendu de Détails, mémoire de master 2, dirigé par Pascal Martin et Sean Cooper, ENS Louis-Lumière, 2023
- JAAFARI Raphaël, Façonner l'image digitale : L'élaboration de looks à l'heure des outils d'étalonnage numérique, mémoire de fin d'études, dirigé par Lucile Domenach, Giusy Pisano et Paul Morin, ENS Louis-Lumière, 2024
- REBMANN Gérard, *Optique ondulatoire : Chapitre VII Optique de Fourier Filtrage*, cours de Licence / L3, 2007
- CNRS CEMHTI, Optique de Fourier et formation des images, document de cours, disponible à l'adresse : https://www.cemhti.cnrs-orleans.fr/images/Personnels/
 42 D Cours Optique de Fourier et formation des images.pdf

Articles et périodiques

- AFC, « Où l'on s'interroge à Camerimage sur la place du DIT auprès du directeur de la photographie », site de l'AFC, disponible à l'adresse : https://www.afcinema.com/Ou-l-on-s-interroge-a-Camerimage-sur-la-place-du-DIT-aupres-du-directeur-de-la-photographie.html
- AFC, « Les Tontons Truqueurs : entre Previz On Set et VFX On Set », site de l'AFC, disponible à l'adresse : https://www.afcinema.com/Les-Tontons-Truqueurs-entre-Previz-On-Set-et-VFX-On-Set.html
- A-DIT, « DIT On Set », disponible à l'adresse : https://www.a-dit.com/dit-onset
- *British Cinematographer*, « Workflow and the role of the DIT », disponible à l'adresse : https://britishcinematographer.co.uk/workflow-and-the-role-of-the-dit/

Sites

- FUENTE Rafael, « Solving the diffraction integral with the fast Fourier transform (FFT) and Python », https://rafael-fuente.github.io/solving-the-diffraction-integral-with-the-fast-fourier-transform-fft-and-python.html
- FUENTE Rafael, « Simulating diffraction patterns with the angular spectrum method and Python », https://rafael-fuente.github.io/simulating-diffraction-patterns-with-the-angular-spectrum-method-and-python.html
- FUENTE Rafael, « Simulating light diffraction with lenses: visualizing Fourier optics », https://rafael-fuente.github.io/simulating-light-diffraction-with-lenses-visualizing-fourier-optics.html
- GitHub *DiffractSim*, projet open source de Rafael Fuente, https://github.com/rafael-fuente/diffractsim/blob/main/README.md
- GitHub *Python SFR Tool*, outil de mesure de la fonction de réponse de fréquence spatiale, https://github.com/jacktseng831/Python_SFR
- Sony Corporation, *Sony Camera Instruction Manual*, disponible à l'adresse : https://www.sony.com/electronics/support/res/manuals/4735/ d4d06ba1e126398ae780667a4317c8c9/47351091M.pdf
- Derivative, *TouchDesigner Operator Wiki*, documentation officielle, disponible à l'adresse : https://docs.derivative.ca/Operator
- GitHub *mtf.py*, bibliothèque Python pour le calcul de la fonction de transfert de modulation, projet de u-onder, disponible à l'adresse : https://github.com/u-onder/mtf.py
- NSHAUD, *TP1 Filtrage (Analyse des images 2D)*, cours en ligne, disponible à l'adresse : https://nshaud.github.io/stmn-analyse-images-2D/TP1%20-%20Filtrage.html
- GitHub Fraunhofer Diffraction & Fourier Analysis, projet de sahooroshni, disponible à l'adresse : https://github.com/sahooroshni/fraunhofer-diffraction fourier-analysis/blob/main/README.md

Normes

- ITU-R BT.1886 *Reference electro-optical transfer function for flat panel displays used in HDTV studio production*, International Telecommunication Union,
 Radiocommunication Sector, Geneva, March 2011, disponible à l'adresse : https://www.itu.int/dms pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.1886-0-201103-I!!PDF-E.pdf
- Organisation internationale de normalisation (ISO), ISO 12233:2024(en),
 Photography, Electronic still picture imaging, Resolution and spatial frequency responses, Genève, ISO, 2024.

Liste des figures

- *Figure 1 Figure de diffraction par une fente.*
- *Figure 2* Montage optique de la diffraction de Fraunhofer.
- Figure 3 Changement du front d'onde au travers d'une lentille convergente.
- Figure 4 Représentation du signal dans le domaine spatial et fréquenciel.
- Figure 5 Transformée de Fourier d'une fente.
- Figure 6 Image obtenue au travers du montage (sans filtrage).
- <u>Figure 6bis</u>- Image obtenue au travers du montage (avec filtrage du centre, mise en avant des contours).
- *Figure 7 Filtrage par une fente dans le domaine de Fourier.*
- Figure 7bis Détramage d'une image.
- <u>Figure 8</u> Conversion Analogique vers Numérique.
- Figure 9 Image sous la forme de matrice (array).
- Figure 10 Filtrage d'une image dans le domaine de Fourier.
- Figure 11 Filtrage numérique dans le domaine de Fourier.
- Figure 12 Courbe MTF: Baisse du contraste avec l'augmentation de la fréquence spatiale.
- Figure 13 schéma illustrant le principe de la PSF
- Figure 14 Tâche d'airy. Ajout coupe avec D.
- Figure 15 Convolution d'une fonction par un Dirac.
- Figure 16 Convolution d'une fonction par une fonction porte.
- Figure 17 Convolution d'une matrice par un noyau de convolution (kernel).
- Figure 18 Image convoluée par des kernel à detection de bord.
- *Figure 19 Image convoluée par des kernel à supression de hautes fréquences.*
- *Figure 20 Relation PSF/FTM.*
- *Figure 21 Différents types de diffusion en fonction de la taille de la particule.*
- Figure 22 Principe de Huygens-Fresnel et mise en évidence des sources secondaires.
- <u>Figure 23</u> Apparition d'étalements de lumières en fonction du nombres de lames de diaphragmes.
- Figure 24 Filtres Tiffen vue au microscope dans le mémoire de Basile Baudelet de 2018.
- <u>Figure 25</u> Fonctionnement d'un Classic Soft, filtre de réduction de netteté, brochure de Shneider's Optics.
- Figure 26 FTM via DxO avec différents filtres de diffusion.

- <u>Figure 27</u> Approximation d'un signal créneau par la somme des 5 premières harmoniques d'une série de Fourier.
- Figure 28 Bord incliné photographié sur mirre et bord numérique.
- Figure 29 Étapes d'obtention d'une MTF d'un bord droit.
- <u>Figure 30</u> Fonction gaussienne pour différentes valeurs de σ .
- Figure 31 ESF/LSF/MTF d'un bord droit convolué par un noyau gaussien.
- Figure 32 Déploiement d'une LSF (1D) en PSF (2D).
- Figure 33 Analyse de PSF d'un bord droit filtré numériquement via Scatter.
- *Figure 34 Détail du code Python.*
- Figure 35 Mire de test à bord incliné.
- *Figure 36 Mise en avant de la régression par bord incliné.*
- Figure 37 Analyse de la PSF d'un bord incliné avec filtres optiques.
- Figure 38 Organisation du programme de simulation de diffusion optique.
- <u>Figure 39</u> Mélange de l'image convoluée et de l'image avant sa convolution (dit de référence).
- <u>Figure 40</u> Différentes formes de PSF et leurs spectres de Fourier respectif pour la valeurs la plus élevée de filtre Black ProMist, de ProMist, de Low Contrast et de SoftFX.
- Figure 41 Optimisation de la vitesse de calcul du programme via Fast Fourier Transform.
- Figure 42 Comparaison de rendu de simulation de diffusion et de véritable diffusion.
- <u>Figure 43</u> Comparaison de rendu de simulation sur de très hautes lumières (à saturation du capteur).
- <u>Figure 44</u> Comparaison de rendu avec deux tailles de noyaux différents (perte de l'effets avec un noyau trop petits).
- Figure 45 Organigramme du projet TouchDesigner en parallèle du programme Python.
- Figure 46 Projet par défaut dans TouchDesigner (opérateur TOP et CHOP).
- Figure 47 Architecture de l'interaction CPU/GPU.
- Figure 48 Exemple de l'opérateur [TOP Bloom].
- Figure 49 MIP mapping d'une image sur 10 niveaux.
- Figure 50 Diffusion sur un flux vidéo via l'opérateur [TOP Blom] et ses paramètres.
- Figure 51 Projet de simulation de diffusion dans TouchDesigner.
- <u>Figure 52</u> Synoptique du flux vidéo de la caméra au moniteur pour de l'étalonnage « on-set » (schéma de B.Barbier).
- *Figure 53* Diapositive de l'implémentation de la diffusion par Sledghammer.
- Figure 54 Diapositive de la première version de diffusion d'Unreal Engine (2012).

Annexes

Test de l'outil d'émulation sur flux vidéo en direct:





Image sans filtre





Image convoluée dans TouchDesigner





Image avec filtre ProMist 1/2





Image sans filtre





Image convoluée dans TouchDesigner





Image avec filtre ProMist 1/2





Image sans filtre





Image convoluée dans TouchDesigner





Image avec filtre ProMist 1/2

ENS LOUIS LUMIÈRE

La Cité du Cinéma – 20, rue Ampère BP 12 – 93213 La Plaine Saint-Denis Tel.0184670001 www.ens-louis-lumiere.fr

Partie Pratique de Mémoire de master



Maman ne m'avait rien dit

Film documentaire

Vianne Burquier et Dorian Maigrot

Cette PPM fait partie du mémoire intitulé : Simulation numérique de diffusion optique.

Direction interne:

Lucile Domenach, enseignante à l'ENS Louis-Lumière

Direction externe:

Brice Barbier, DIT

Présidente du jury cinéma et coordinateur des mémoires:

Giusy Pisano et David Faroult

Présentation et Synopsis

Pour la partie pratique de notre mémoire, Vianne Burquier et moi avons choisi de créer un film en binôme. Son mémoire, « Filmer les femmes qui vieillissent, une utopie cinématographique ? », et le mien, « Simulation numérique de diffusion optique », présentent des points communs, notamment dans l'exploration de la texture de la peau et des outils permettant de la modeler à l'image. Vianne a donc réalisé le film que j'ai mis en image.

Maman ne m'avait rien dit est un documentaire tendre et joyeux sur l'invisibilisation de la ménopause, construit autour d'un dialogue entre une mère et sa fille. Cet échange intime devient l'occasion d'un témoignage et d'une transmission sur un sujet encore trop souvent tabou. À travers plusieurs tableaux, nous évoluons dans des espaces à la symbolique forte, cherchant à raconter ce corps en transformation et cette étape fondamentale dans la vie d'une femme. Le film se clôt en sortant du studio pour retrouver un espace plus réel, offrant à Corinne et Vianne l'occasion de célébrer ensemble ce passage de la vie.

Note d'intention de la réalisatrice

Ma mère, Corinne, dix ans après le début de sa ménopause, m'appelle et au téléphone, me dit : « Moi je n'ai pas su, j'étais seule, je veux que tu saches. ». Elle me décrit cette période de sa vie comme un cataclysme physique qu'elle n'a pas pris le temps de vivre et qu'elle ne comprend que maintenant. À 57 ans, il lui a été diagnostiqué une ostéoporose sévère. Cette fragilisation des os est une conséquence commune de la baisse de production d'hormones, mais c'était sans compter sur l'absence d'accompagnement gynécologique pour les femmes



ménopausées, le diagnostique a été posé dix ans trop tard. C'est avec beaucoup de colère qu'elle me dit que l'on a plus le droit de laisser les femmes vivre cela seule. Alors elle me raconte.

L'envie de ce film est de redonner à voir et à entendre avec tendresse et humour ce moment de la vie, socialement perçu comme un pas significatif sur la longue pente de décrépitude que serait le vieillissement. C'est un film sur la transmission, le transgénérationnel, pour que chacune vive la solitude de son corps de femme avec un peu plus de douceur. La majeure partie du tournage du film se déroulera en studio. L'intérêt est multiple, d'une part cela nous permettra une maitrise esthétique très grande pour mettre en œuvre les réflexions du mémoire et d'autre part de remettre en scène des discussions qui ont déjà existé. Cela nous permettra d'assumer la part artificielle du dispositif tout en insufflant par des choix forts de décors de nouvelles dynamiques de discussion afin de chercher l'imprévu du

documentaire. En effet, certaines dispositions dans l'espace nous éloigneront l'une de l'autre et modifieront ainsi le contexte de nos échanges.

La colonne vertébrale du film s'échafaudera autour d'un décor principal. Construits comme une ligne temporelle, ses volumes chapitreront les étapes du film. Les discussions que nous avons partagées avec ma mère m'ont amené à penser un chapitrage selon les étapes du deuil. Ces phases, qui ne seront pas lisibles à l'écran, seront pour ma mère et moi un canevas directeur. Dans le cas du décor ci-dessous, chaque étape spatiale établira ce dont nous parlerons jusqu'à ce que nous sentions qu'il est temps de passer à l'étape suivante. La structure principale sera entremêlée avec des tableaux, ces brèves évocations visuelles viendront mettre en perspective les mots avec des images pour chercher une nouvelle résonance. De la même manière, le son sera utilisé avec beaucoup de liberté pour créer des liens de sens et de sensation.

S'agissant d'un film de transmission, la question de ma place dans la mise en scène devient un ressort narratif. Dans la première séquence, nous aurons l'une et l'autre la même place à l'image et au son pour rentrer dans l'histoire de sa ménopause par le prisme de notre relation. Ensuite je disparaitrais peu à peu. Dans le décor principal, je serai debout avec elle puis elle parcourra le décor tandis que je resterai au départ. Pour la dernière partie, elle sera centrale à l'image et au son.

Articulation partie théorique/pratique

Synthèse des résultats

Sujet : Filmer les femmes qui vieillissent, une utopie cinématographique ?

Au delà du lien thématique qu'apporte le sujet du documentaire avec mon mémoire, les

enjeux de recherche technique se joueront dans les choix et les expérimentations visuelles

que permettrons le film. Parmi eux on peut citer :

• Une recherche autour des volumes et irrégularités du visage par un travail d'axe et de

qualité de lumière. Cela pourra, par exemple, prendre place lors de la première séquence

face au miroir. La lumière pourrait évoluer au court du plan passant d'un flux très

enrobant de face type « lumière banquise » à un axe beaucoup latéral et à contre par

rapport à la caméra pour marquer les micro- contrastes.

• Une évolution de l'éclairage du cou pour voir l'impact qu'il peut avoir sur la sensation

d'âge dans le cas particulier de ce film.

• Une recherche sur la mise en évidence et la disparition des disparités colorées de la peau

par les outils de la lumière, du maquillage et de la postproduction. Une recherche sur la

texture de la peau. En cela le travail de co-PPM avec Dorian Maigrot prend tout son sens

puisqu'il sa recherche porte sur les effets de diffusion en post production. Cela nous

permettra de par exemple faire évoluer la texture de la peau au cours d'un plan / du film.

Nous aurons également la possibilité de travailler un effet de diffusion en différenciant le

sujet et le décor.

• Une recherche autour du changement de la diffusion interne aux couches de la peau avec

l'âge ainsi que de la brillance en surface.

Sujet: Simulation numérique de diffusion optique

L'un des enjeux les plus intéressants dans notre recherche commune en PPM est l'étude de la texture de la peau. La réflexion de Vianne sur la manière de filmer les visages me permet de mettre en pratique mes études sur les outils de diffusion numérique afin de mieux contrôler le rendu des détails et des micro-contrastes d'une scène. Au-delà de l'intérêt certain que représente l'étude de la lumière sur la peau, des problématiques communes relatives aux fonctions de transfert de modulation se posent lorsqu'il est question de texture cutanée. Mon objectif dans cette PPM est donc d'approfondir mes recherches sur le rendu des textures en comparant la diffusion optique et numérique. L'idée est d'exploiter ce tournage pour capturer des images avec et sans filtre optique, dans un environnement lumineux contrôlé, afin d'analyser les solutions de diffusion proposées par la post-production et de réaliser un comparatif pertinent.

Dans un second temps, mon attention se porte particulièrement sur la gestion des hautes lumières. L'environnement du studio et la volonté de Vianne d'explorer l'éclairage des scènes à travers une lumière d'abord diffusée, puis rasante, m'offrent un cadre idéal pour étudier le comportement des solutions de diffusion numérique face aux hautes valeurs de luminance d'une scène. À travers cette mise en scène lumineuse, j'espère explorer les limites de la surexposition et analyser le comportement des halos lumineux créés par les filtres. Ce sera également une occasion précieuse pour interroger la place du HDR dans notre workflow et évaluer, à la restitution des images, la pertinence des filtres optiques dans la diffusion des très hautes lumières.

Enfin, ce projet est l'opportunité de mettre en pratique notre réflexion commune sur l'utilisation des outils de post-production dédiés à la sélection et autre masques dans le traitement de la texture. Permettre la diffusion numérique revient à pouvoir l'appliquer à des zones spécifiques et en mouvement au sein du plan. Nous aimerions ainsi explorer les possibilités de diffusion ciblée, soit uniquement sur le visage, soit exclusivement sur le décor entourant le sujet. Si les outils dits de Beauty sont largement employés en post-production, l'émergence de simulations spécifiques de filtres optiques ouvre une nouvelle approche plus proche des habitudes des chefs opérateurs, reposant sur un fonctionnement par modèles de filtres et une incrémentation d'effet en 1, 2, 1/4 ou 1/8 d'intensité.

À la suite de cette partie pratique de mémoire, j'ai pu mettre à l'épreuve plusieurs outils de diffusion numérique, dont certains ont été expérimentés sur un flux vidéo en direct. Ces tests approfondis ont enrichi la dernière section de mon mémoire et m'ont permis d'y synthétiser l'ensemble de mes recherches (voir IV – Intégration dans un workflow).

Liste matériel

Caméra	Quantité
Venice	1
Cartes AXSM	2
Lecteur carte	1
Betterie Vlock	4
Chargeur 2 voies	1
Optique Prêt ARRI	
Signature Zoom (16-32 mm)	1
Signature Zoom (24-75 mm)	1
Signature Zoom (45-135 mm)	1
Diffusion Optique	
LMB 4x5 Pro (dos 114mm)	1
Kit Série BPP	1
Kit Série PM	1
Kit Série LC	1
Kit Série Soft FX	1
FIZ	
Pan Bar Zoom	1
FF5	1
Monitoring	
Sony 24"	1
Stalite HD	1
Bebob 1200	1

Branches	Quantité
Grande Branche	2
Petite Branche	2
Tête 9x9	2
Base	2
Cube 40	2
Structure	
Praticable	1
Doly	
Elemack	1
Mini JIB	1
Rail 3m	4
Rail 2m	2
Rail 1m	4
Borgnol	
Borniol 6x6	2
Borniol 3x2	1
Borniol 4x5	1
Consomable	
Gaffer	2
Permacel	2

Sources	Quantité
M18	2
Skypanel S60	4
SL1 Switch	2
Vortex	2
Découpe de 2 KW	2
Joker 1600W + Bug A Beam	2
Kit Astera Titan + loover	1
Electricité	
Connect 1 + iPad luminair	1
Prolongs 16A	10
Prolongs 32A	5
Boîte M6	4
3kW dimmer dmx	2
Diffusion	
Gélatines CTO, 1/2 CTO, Green, 216, 250, 251	1
Cadre 120	3
Réflexion	
Cadre 8x8 avec Toiles Bounce	1
Grand poly	2
Moyen Poly	2
Négatif	
Floppy 120x120	2
Jeu de drapeaux	3
Jeu de mamas	1
Borniol 3x2 m	2

Caméra	Quantité
FX3	1
Cartes	2
Lecteur carte	1
Betteries	4
Optique	
Série Sigma	1
Diffusion Optique	
LMB 4x5 Pro	1
Kit Série BPP	1
Kit Série PM	1
Kit Série LC	1
Kit Série Soft FX	1