

École Nationale Supérieure Louis Lumière



Mémoire de Master II

Reconstruction du flou d'objectif à partir de données issues de caméras plénoptiques

Réalisé sous la direction de

M. Pascal MARTIN, Maître de conférences HDR à l'ENS Louis Lumière

M. Mathieu BRÉDIF, Chargé de recherche à l'Institut Géographique National

Membres du jury :

Mme. Véronique FIGINI-VERON, Enseignante-Chercheure à l'ENS Louis Lumière

M. Pascal MARTIN, Maître de conférences HDR à l'ENS Louis Lumière

M. Mathieu BRÉDIF, Chargé de recherche à l'Institut Géographique National

M. Jacques HÉMON, Directeur de la rédaction Le monde du regard

M. Lâ mân LELÉ GARD, Ingénieur d'études à l'Institut Géographique National

Léo Morillon

Spécialité Photographie - Promotion 2015

Remerciements

Je tiens à remercier les membres du jury pour leur lecture et leur intérêt envers ce sujet qui est, il faut l'admettre, assez singulier vis-à-vis des thèmes habituellement traités à l'école.

Je remercie bien entendu mon directeur de mémoire Pascal Martin, qui m'a apporté un soutien sans pareil ainsi qu'une rigueur méthodologique et scientifique qui lui est propre.

Je remercie Mathieu Brédif qui m'a supervisé sur la partie programmation et technique de mes recherches, pour sa considérable disponibilité et ses efforts de vulgarisation, le tout malgré les momentanés changements de conditions des directions externes des mémoires de fin d'études.

Je remercie Raphaele Héno ainsi que toute l'équipe enseignante de l'École Nationale des Sciences Géographiques pour m'avoir accueilli durant cette année universitaire, établissement où j'ai acquis des connaissances techniques et pu découvrir de nouveaux domaines d'applications de l'image.

Merci à Christian Heinze, *light field engineer* au sein de Raytrix GmbH pour s'être démené afin de me prêter une de leurs caméras, et aussi pour son support technique à toute heure.

Merci à Christian Delysse de Lytro France pour le prêt du boîtier Lytro Illum, sans lequel cette étude aurait été incomplète.

Merci à Gaylord Balizet pour ses remarques avisées et son aide quant à la réalisation de la partie pratique de ce mémoire, et pour m'avoir diagnostiqué tritanope.

Merci à Krystoffer Rygg, BADBADNOTGOOD, et Hyacinthe pour m'avoir accompagné durant ces nuits d'écriture.

Résumé

“Peut-on demander à la Photographie de nous rendre toute cette variété qu’offre la vue directe des objets ? Est-il possible de constituer une épreuve photographique de telle façon qu’elle nous représente le monde extérieur s’encadrant, en apparence, entre les bords de l’épreuve, comme si ces bords étaient ceux d’une fenêtre ouverte sur la réalité ? Il me semble que oui.”¹

Ainsi en 1908, Gabriel Lippman décrivait son point de vue concernant l’avenir de la photographie. Environ cent ans plus tard, Ren NG, fondateur de Lytro, mettait au point un dispositif de prise de vue dit plénoptique, du latin *plenus* (plein, complet, entier) et *optic* (relatif à l’œil ou à la vision), grand public. Cette nouvelle catégorie d’appareil amène un renouvellement des pratiques sans pour autant venir remplacer celles déjà existantes, à l’inverse de la conquête du marché de la photographie par les appareils numériques au détriment de l’argentique.

Mais si les caméras plénoptiques font partie des plus grandes innovations contemporaines dans le domaine de l’image, aucun acteur du domaine n’a jusqu’ici su s’intéresser à l’esthétique du flou dans les images propres à ces systèmes. Les algorithmes de flous existants sont donc utilisés et même abusés sans se soucier du rendu photographique que l’on connaît et apprécie. Le but de ce mémoire est de fournir différentes ouvertures à travers l’expérimentation de méthodes de reconstruction du flou à partir de données issues de caméras plénoptiques.

On s’intéressera tout d’abord à l’historique de cette technologie, puis à son contenu scientifique et à ses applications, et enfin à l’aspect expérimental des recherches effectuées.

Mots clés : Plénoptique, flou, *light field*, convolution, carte de profondeur, Lytro, Raytrix

¹ Gabriel Lippmann, “Epreuves réversibles donnant la sensation du relief”, Académie des sciences, séance du 2 mars 1908.

Abstract

“Can we ask Photography to render all the variety offered by the direct observation of objects ? Is it possible to create a photographic print so it would present us the outer world framing itself, seemingly, between the bounders of the very print, just like if these bounders were those of an open window leading on reality ? I genuinely think so.”¹

Thus in 1908, Gabriel Lippman described his belief about the future of photography. About a hundred years later, Ren NG, founder of Lytro Inc., was developing a consumer-oriented plenoptic camera, from the Latin terms *plenus* (full, complete), and *optic* (related to the eye and vision). This new category of camera brings a new set of practices without replacing the usual ones, unlike the conquest of the photography market by digital cameras at the cost of film cameras.

Even though plenoptic cameras are among the greatest innovations of our age, no one in this field has ever become interested in the aesthetic quality of the blurring of the images inherent to these systems. The existing blur algorithms are hence used and abused without considering its very rendering peculiar to photography that we know and appreciate. The goal of this thesis is to bring various openings through the test of blur reconstruction methods from plenoptic data.

Firstly, we will focus on the history of this technology, then on its scientific content and its applications, and finally we will study the experimental approach of the research conducted in this field.

Keywords : Plenoptic, blur, light field, convolution, depth map, Lytro, Raytrix

¹ Gabriel Lippmann, “Epreuves réversibles donnant la sensation du relief”, Académie des sciences, séance du 2 mars 1908. Traduit par mes soins

Sommaire :

Remerciements	1
Résumé	2
Abstract	3
Sommaire	4
Introduction	6
I - Le relief : entre perception et lumière	8
I.1 - L'oeil et les fondements du <i>light field</i>	8
I.1.a - Vision et perception du relief.....	8
I.1.b - Du pinceau de lumière au <i>light field</i>	11
I.2 - Histoire du relief.....	18
I.2.a - Méthodes primitives.....	18
I.2.b - Méthodes intégrales.....	21
I.2.c - Relief et cinéma.....	26
II - L'image plénoptique et son rapport au flou	32
II.1 - La technologie du <i>light field</i>	32
II.1.a - Principes théoriques.....	32
II.1.b - Évolutions des dispositifs.....	37
II.1.c - Recherche expérimentale et avenir de la technologie.....	41
II.2 - Applications du <i>light field</i> et marché actuel.....	45
II.2.a - Applications générales.....	45
II.2.b - Applications scientifiques.....	47
II.2.c - Acteurs du marché.....	51
II.3 - Flou photographique et plénoptique.....	54
II.3.a - Nature du flou.....	54
II.3.b - Le problème du plénoptique.....	56
II.3.c - Flous algorithmiques.....	58
III - Expérimentations et tentatives de reconstruction	64
III.1 - Raytrix.....	64
III.1.a - Présentation.....	64
III.1.b - Mise en pratique.....	68

III.2 - Lytro.....	73
III.2.a - Présentation.....	73
III.2.b - Mise en pratique.....	75
III.3 - Méthodes expérimentales et ouvertures.....	79
III.3.a - Une technique spécifique au plénoptique.....	79
III.3.b - Une méthode utilisant des données de profondeur.....	81
Conclusion.....	83
Bibliographie.....	85
Table des illustrations.....	90
Annexes.....	93

Introduction

On peut encore régulièrement assister à des débats mouvementés au sujet de la transition entre la photographie argentique et numérique, bien que l'industrie de la première ne soit plus que l'ombre d'elle-même. Au-delà des changements que ce passage a induits dans les pratiques des initiés, la photographie numérique est désormais une activité à laquelle personne n'échappe, ne serait-ce qu'avec la propagation des dispositifs de prise de vue.

À ses débuts, l'histoire de la photographie, du relief, et du cinéma, que nous allons aborder plus amplement dans ce mémoire, est celle de passionnés, d'inventeurs (parfois un peu fous), de scientifiques ayant attiré à l'esthétique de l'image, et aussi de la sérendipité. Les personnes impliquées dans cette oeuvre au sens global avaient toutes une volonté d'améliorer l'enregistrement du réel à travers l'image, en prenant pour référence ce qui plaisait à notre oeil. On peut notamment penser à Lippmann avec sa méthode interférentielle résultant en des couleurs sans égales à l'époque, ou encore l'utilisation d'objectifs plutôt que de simples sténopés afin d'augmenter la netteté et la profondeur de champ dans les images.

Cependant, la transition à la photographie numérique n'est malheureusement pas le fruit du travail de ces personnes. L'imagerie numérique au sens large remonte à une période bien antérieure à cette fameuse rupture, et est essentiellement l'apanage d'ingénieurs et de chercheurs en informatique. En effet, la numérisation de l'image est un procédé reposant sur des bases scientifiques de haut niveau. L'extrême technicité de cette technologie a en quelque sorte empêché des connaisseurs de l'esthétique habitués à concevoir leurs dispositifs. Cela a résulté en une rupture qui fait l'objet de débats, accusant la photographie numérique de ne pas être adaptée aux photographes, et vantant les mérites qualitatifs du film argentique.

Cela n'empêche pas l'imagerie numérique d'évoluer et de proposer des applications si diverses que la photographie professionnelle n'est plus qu'une relativement faible part du marché pour les constructeurs, qui sont eux acteurs du domaine de l'imagerie au sens large. Une innovation qui m'a beaucoup intrigué dès sa présentation au grand public n'est autre que celle des caméras plénoptiques,

reposant sur le principe du *light field*, dont les détails seront expliqués plus tard dans ce mémoire. Le Lytro, petit appareil photographique en forme de tube, proposait alors à son utilisateur de réaliser une prise de vue pour en choisir la mise au point une fois celle-ci transférée sur son ordinateur. Au-delà du débat stérile que cela peut provoquer chez certaines personnes mal informées, cette technologie me paraît être un apport fondamental, aussi bien dans la photographie que dans l'imagerie, notamment concernant le relief. Seulement, même avec les évolutions que ces dispositifs ont connues, le problème de la dichotomie entre science et esthétique est une nouvelle fois apparu ici.

En effet, il est possible avec un tel dispositif de choisir, *a posteriori*, le plan de mise au point ainsi que la profondeur de champ, mais l'esthétique du flou est alors complètement oubliée. Cela résulte en des images où les zones nettes sont de bonne qualité, mais avec un algorithme de flou strictement appliqué en dehors de ces dernières. La problématique de ce mémoire s'articule alors autour de deux axes : la reconstruction du flou à partir de données type *light field*, ainsi que sur les potentielles méthodes que l'on pourrait apporter pour améliorer la qualité du flou et ainsi résoudre le problème sus-cité. Nous allons donc chercher à répondre à la question suivante : comment reconstruire un flou d'objectif qualitatif à partir d'images plénoptiques ?

Nous nous intéresserons dans un premier temps à l'histoire des connaissances au sujet de la vision, et notamment de la perception du relief, ainsi qu'à celle des techniques de prise de vue en relief. Nous verrons ensuite les bases scientifiques sur lesquelles repose la technologie plénoptique ainsi que ses potentielles applications. Enfin, nous consacrerons la dernière partie de ce mémoire à l'étude de diverses méthodes de reconstruction du flou, et utiliserons pour cela différents dispositifs de prise de vue *light field*.

Ce mémoire fait appel à des notions en science avec lesquelles tous les lecteurs ne seraient pas nécessairement familiers, c'est pour cela que j'ai concentré mes efforts sur la vulgarisation de ces points. Je me suis efforcé d'utiliser le moins de formules possible ainsi que d'illustrer mes propos au maximum afin que ce travail soit accessible à tous, et plus particulièrement aux personnes qui ne sont pas toujours à leur aise avec l'aspect technique de la photographie.

I - Le relief : entre perception et lumière

I.1 - L'œil et les fondements du *light field*¹

I.1.a - Vision et perception du relief

I.1.a.1 - Profondeur et camera obscura

Si la notion de relief tient une place importante dans la technologie des caméras plénoptiques, il est nécessaire de définir son rapport à notre vision. En effet, l'appréciation des profondeurs est liée à la perception des perspectives, et cette spécificité fait encore l'objet de nombreuses études dans des domaines aussi bien artistiques que scientifiques.

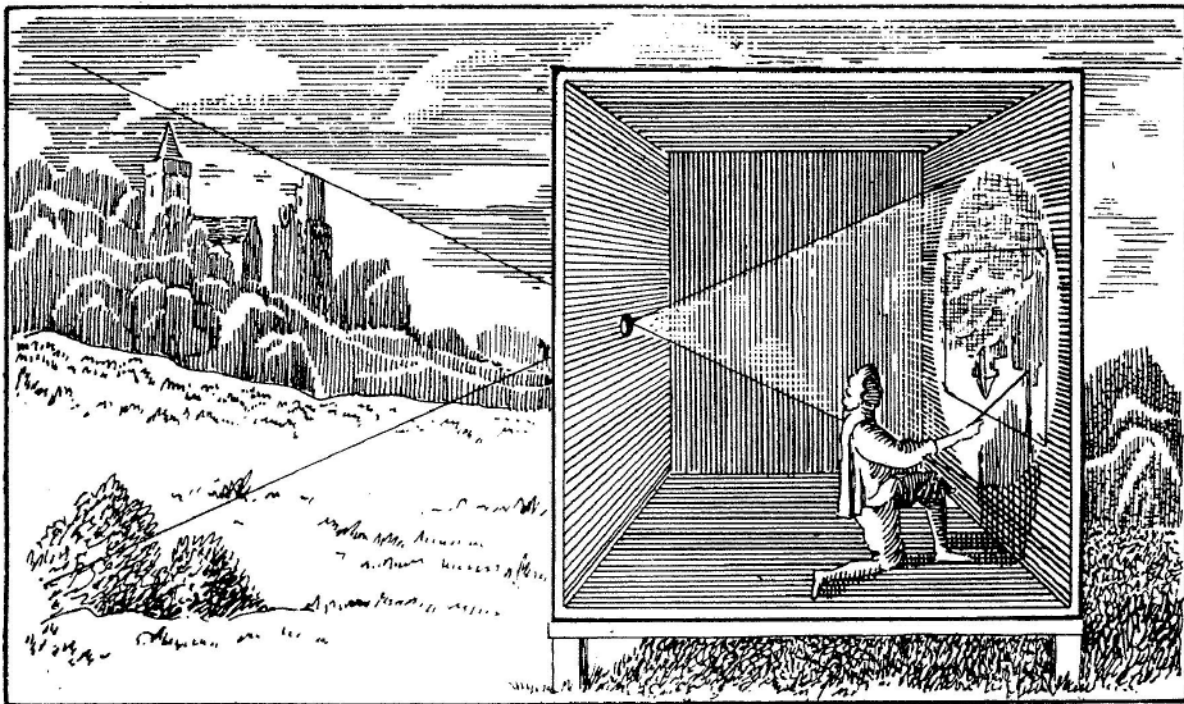


Figure 1 : Artiste utilisant le dispositif de la camera obscura afin de peindre un paysage

La peinture, bien avant la photographie et le cinéma, soulevait déjà des questionnements au sujet de la profondeur, et ce dès l'antiquité. L'invention de la *camera obscura*, dispositif permettant de projeter notre environnement sur un

¹ Le *light field* est un concept physique décrivant la quantité de lumière dans toutes les directions et qui sera introduite plus tard dans ce mémoire. Malheureusement, une traduction en "champ lumineux" serait incorrecte, c'est pourquoi je choisis de conserver ici le terme anglophone.

plan en deux dimensions, offrait ainsi une réponse simple et fonctionnelle à la question de la restitution de la profondeur dans le dessin. Cet objet connu de tous met en exergue les difficultés que les artistes éprouvaient alors à illustrer en une image l'interaction entre de multiples plans de leur environnement, eux-mêmes situés à différentes distances de leur observateur.

I.1.a.2 - Léonard de Vinci

Les premières études scientifiques à ce sujet remontent à la Renaissance, et plus précisément au XV^e siècle, avec Léonard de Vinci. On trouve moult textes au sujet de la perception et de ses liens avec les arts dans ses carnets de notes, qu'il a écrits tout au long de sa vie. Ce dernier place l'œil au centre des organes sensoriels dont dispose l'être humain, comme un sens suprême dont la supériorité vis-à-vis de ses pairs ne peut poser de doute. Il va même jusqu'à décrire le corps comme une prison de l'esprit si par malheur on en venait à perdre la vue¹.

Sa conception s'articule autour d'un pilier central qui est fondamental dans la description de la vision. Selon Léonard de Vinci, les yeux constituent une fenêtre ouverte sur le monde extérieur, argument cohérent avec la supposée hégémonie sensorielle de la vue. La qualification *d'ouverture sur le monde* est ici importante, car elle conditionne la présence de la perspective. En effet, utiliser la notion de perspective en dehors du cadre d'un système optique n'a pas de sens, étant donné le lien étroit entre cette notion et celle d'image. Léonard de Vinci l'ayant bien compris, définit alors la vision comme un angle d'ouverture sur l'environnement, fonctionnant comme un système optique rudimentaire, et plus spécifiquement en faisant un parallèle intéressant entre le comportement de l'œil et celui de la *camera obscura*.

Les objets autour de l'observateur se projettent dans son œil qui en crée ainsi une image. Il décrit la disposition des rayons lumineux comme une pyramide dont la base correspond au champ de vision et dont le sommet se trouve dans la pupille. Il existe un nombre infini de pyramides décrites ainsi, étant donné qu'il y en a une propre à chaque variation d'angle de vue, de position de l'observateur, de lumière ambiante, etc. Cette description est intéressante, car elle introduit la

1 da VINCI L. *Notebooks*, Oxford University Press, 2008, première publication en 1952.

notion de rayons lumineux qui seraient à la fois dirigés et présents dans toutes les directions. L'auteur va même plus loin en décrivant le plan perçu par l'observateur comme étant assimilable à l'intersection de la pyramide par une plaque de verre, formant ainsi sa base et rappelant encore une fois le fonctionnement de la *camera obscura*.

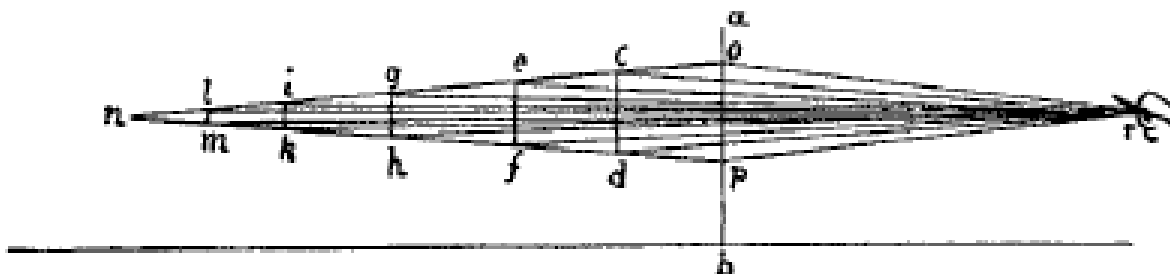


Figure 2 : Les différentes pyramides théoriques décrites par Léonard de Vinci : l'angle de leur sommet et la taille de leur base dépendent du champ sur lequel l'observateur se concentre; il est le premier à définir une telle notion.

On aborde ensuite les différentes étapes de la perception, qui se passent elles dans le cerveau de l'observateur. La première chose que celui-ci perçoit est relative aux lignes, contours, et formes de son environnement. Viennent ensuite les couleurs, seconde étape de l'analyse visuelle, et enfin la perception du relief et de la profondeur. Léonard de Vinci précise que passée une certaine distance il devient alors difficile de distinguer les distances entre les objets. Il note aussi cela ne peut s'appliquer à ce qu'il décrit comme étant des sources de lumière, remarque que l'on peut dorénavant généraliser à toute forme de reflet spéculaire.

Concernant l'appréciation de la profondeur, deux critères sont à noter : la taille des objets et l'éclairage qui leur est appliqué. Un objet plus gros ou plus éclairé paraîtra plus proche, et inversement.

I.1.a.3 - Apports de Descartes et sciences cognitives modernes

Descartes fut le second à proposer une étude de la perception visuelle qui soit complète dans son ouvrage *La Dioptrique*, en annexe du *Discours de la Méthode*. Il s'intéressait aussi bien à la nature de la lumière qu'au traitement de l'image rétinienne par le cerveau, en plus d'avoir rigoureusement décrit la réfraction.

Il décrit la perception de la profondeur comme le fruit de l'accommodation oculaire¹. Étant donné que l'œil doit s'adapter aux distances afin de relayer une image nette, la position des objets par rapport à l'observateur peut en être déduite. Cette explication est intéressante et en elle-même pas complètement erronée, mais elle reste incomplète. En effet, l'accommodation de l'œil varie très peu passé un ou deux mètres. L'adaptation de l'œil ne peut être la seule explication à la perception de la profondeur, d'autant plus qu'une telle spécificité impliquerait une réaction différée le temps que l'œil procède à ces mouvements d'accommodation.

Des recherches plus récentes² ont indiqué que l'arrangement des contours contenus dans la scène observée joue un rôle important dans l'appréciation de la profondeur. La superposition des objets est aussi utile au cerveau dans ce dessein, tout comme l'obstruction totale d'un objet par un autre de façon monoculaire; ainsi l'on détecte la présence de l'objet et sa position relative. La présence de texture est aussi une information importante, sa nature permettant elle aussi l'évaluation des distances.

Cependant notre système visuel n'est pas adapté à l'estimation de distances absolues; nos yeux nous permettent d'évaluer les positions relatives des objets, mais pas de mesurer la profondeur efficacement. Il est important de noter que le système binoculaire dont nous disposons est tout de même le plus adapté à la perception du relief, car il ne nécessite pas la réalisation de différentes mesures dans le temps, contrairement à la méthode l'accommodation décrite par Descartes ou encore celle de la parallaxe, toutes deux pouvant être aussi bien exercées par des systèmes monoculaires.

I.1.b - Du pinceau de lumière au *light field*

I.1.b.1 - Léonard de Vinci, Michael Faraday, et la lumière

En plus d'avoir contribué à formaliser les mécanismes de la vision, Léonard de Vinci a aussi décrit la propagation de la lumière. Sa description des pyramides

1 R. DESCARTES, Discours de la Méthode, plus La dioptrique, Les météores et La géométrie, Editions de l'Académie des Sciences, 1637, première publication en 1956.

2 HOWARD I.P. Perceiving in Depth, Volume 1, Oxford University Press, 24 février 2012.

de rayons lumineux étant déjà définie, il précise alors qu'elles sont présentes partout dans l'environnement, s'entre-croisant entre elles sans pour autant créer d'interférences. Ces pyramides décrites dans ses textes sont aujourd'hui appelées rayons lumineux selon une définition plus généraliste. La théorie exposée ici indique qu'un objet visible (qu'il reflète la lumière ou en émette) propage des pyramides de lumière dans toutes les directions (d'où la notion d'intersection) dont les bases rencontrent celles des pyramides dont les sommets sont dirigés dans l'œil de l'observateur.

La caractéristique la plus importante des descriptions de de Vinci est le fait qu'un objet théorique contienne toute l'information relative à la lumière arrivant en un point. On définit ici un ensemble de caractéristiques dont la direction et la position de tous les rayons lumineux, ce qui est ni plus ni moins qu'une des prémices du *light field* à venir.

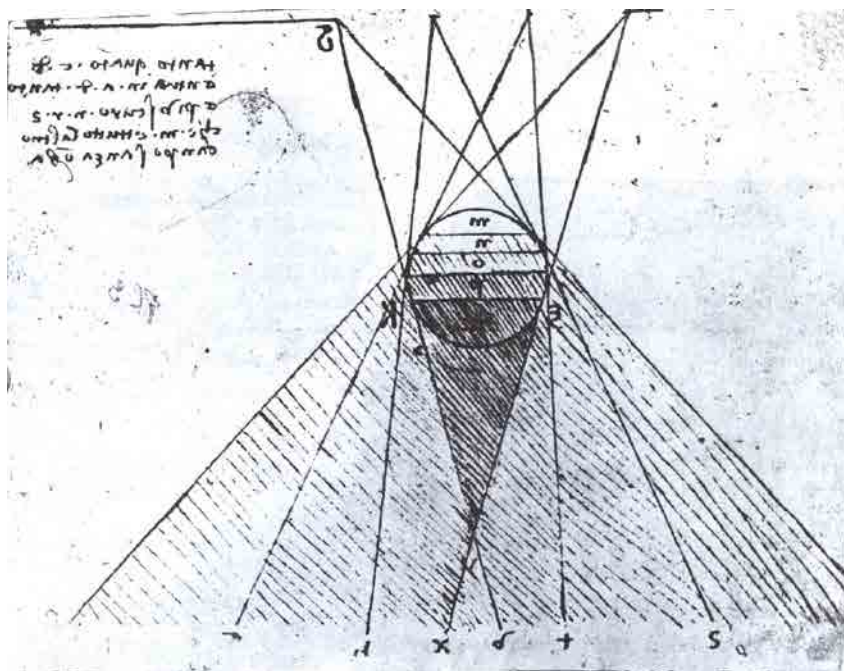


Figure 3 : La rencontre des pyramides émises par l'environnement et celles de l'œil servant à la perception.

Il faut aussi souligner l'apport de Michael Faraday à la connaissance de la nature de la lumière. En effet, ce dernier suggérait que la lumière doive être considérée comme un champ comparable au champ magnétique. Il formalisa par la suite l'effet qui porte son nom, décrivant l'interaction entre la lumière et un champ magnétique, ainsi que les effets induits sur la polarisation de cette dernière.

Faraday faisait aussi un parallèle entre la lumière et le courant électrique, suggérant que leurs comportements étaient semblables bien que l'électricité possède une vitesse plus faible.

I.1.b.2 - Arun Gershun et le *light field*

Il faut ensuite attendre 1936 pour qu'un physicien russe, Arun Gershun, formalise le concept de *light field*. Sa description marque son époque par une nouvelle approche de la nature de la lumière en trois dimensions. Son but était alors d'approfondir la photométrie en proposant une nouvelle méthode de quantification de la lumière, qui ne fut d'ailleurs pas acceptée par ses pairs dès sa publication.

Gershun déclare tout d'abord qu'il est nécessaire de séparer l'analyse de la nature de la lumière de celle de son émission. Il définit le *light field* comme étant un ensemble de rayons émis par une source¹ (qui peut aussi être un objet éclairé réfléchissant des rayons) et dont les différentes intensités et directions sont connues. Il précise aussi qu'à chaque point d'un light field donné correspond une valeur d'intensité spécifique; cette intensité est donc fonction de la position dans l'espace et de la direction des rayons, en cohérence avec les lois traditionnelles de la photométrie.

$$d\Omega = \frac{ds \cos \theta}{r^2}$$

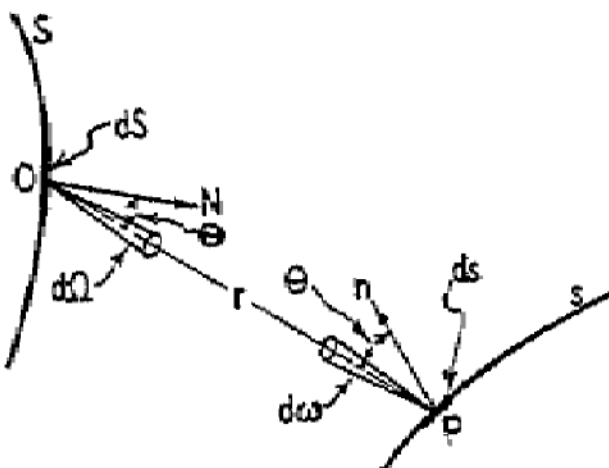


Figure 4 : Les démonstrations de Gershun s'appuient sur des notions de photométrie, telle que l'angle solide d'un flux lumineux, et ne sont pas si éloignées de la notion de pyramide de de Vinci. Il va même jusqu'à définir l'interaction entre un corps émetteur et un corps récepteur de lumière, comme exposé sur le schéma ci-contre.

¹ GERSHUN A. "The Light Field", Moscow, 1936, trans. by P. Moon and G. Timoshenko, J. Math. and Physics, 1939, vol. 18, pp. 51-151.

Gershun précise aussi la nécessité d'utiliser la notion d'intensité bien que cette dernière soit plus courante dans l'étude des sources que dans celle des faisceaux. Bien que ce point de vue complexifie l'étude d'une scène illuminée, il s'impose par le besoin de rapporter toute l'information observée, surtout si le flux rencontre des obstacles qui modifieraient sa nature. L'auteur justifie cela par un exemple très simple : l'intensité lumineuse du ciel dépend de la position de l'observateur, mais aussi de la direction sous laquelle il est observé; il est donc nécessaire de définir l'intensité selon ces paramètres de manière générique.

L'auteur propose aussi une description succincte de la réaction de l'œil au *light field*. En appréciant un nouvel environnement, le système visuel appréhende la quantité de lumière présente autour de lui, ainsi que l'uniformité de la répartition de cette dernière, mais aussi l'éventuelle présence de sources de type spéculaire, qui ont une forte influence sur l'œil à cause de l'éblouissement qu'elles induisent. Ainsi la perception des spéculaires est volontairement occultée pour éviter les éblouissements, et la quantité de lumière que laisse entrer la pupille est déterminée par rapport à la lumière contenant une information utile au système visuel.

I.1.c - La fonction plénoptique et ses applications

I.1.c.1 - Définition de la fonction plénoptique

Il faut attendre 1991 pour que Edward H. Adelson et James R. Berger, deux chercheurs du MIT, publient un article intitulé *The Plenoptic Function and The Elements of Early Vision*, dans lequel ils définissent les fondamentaux de l'application de l'analyse en *light field* à l'informatique graphique¹. Cet article se concentre sur l'étude des éléments visuels (comprendre, la lumière et ses implications) et de leur relation avec la structure de l'information visuelle (ce qui peut être perçu par notre système oculaire)².

Plénoptique vient du latin *plenus*, complet, entier, et *optic*, qui fait référence

1 La notion d'informatique graphique désigne l'étude de la manipulation de données visuelles avec un ordinateur.

2 ADELSON E., BERGEN J. "The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision", MIT Press, 1991, pp. 3 - 20.

ici à la vision. Sa définition décrit une fonction de cinq paramètres, à savoir les trois coordonnées du point étudié et les deux angles comportant l'information directionnelle. Contrairement à la version de Gershun, cette fonction décrit la luminance du point étudié, et non son intensité. On peut aussi extrapoler cette fonction à deux paramètres supplémentaires, qui sont la longueur d'onde et le temps, mais cela complexifie l'étude et n'est pas nécessaire ici.

$$f(\theta, \Phi, \lambda, t, X, Y, Z)$$

Définition de la fonction plénoptique à cinq paramètres :

(θ, Φ) représentent l'orientation du rayon lumineux en coordonnées polaires

λ représente la longueur d'onde du rayon (absent dans le modèle à cinq variables)

t représente le temps (le moment) auquel les autres valeurs sont définies (absent aussi dans le modèle réduit de la fonction)

(X, Y, Z) représente les coordonnées du point étudié

Cette fonction est décrite comme étant une représentation holographique complète de l'environnement visuel, et non un modèle pour la perception. Elle a pour rôle d'assurer le lien entre le monde situé autour de l'observateur et les images qui se forment sur sa rétine, et contient toute l'information disponible au moment de l'observation. Ses applications se trouvent essentiellement dans l'informatique graphique, principalement en matière de rendu d'objets en trois dimensions.

I.1.c.2 - Simplification de la fonction et applications

C'est cinq ans plus tard, en 1996, que deux chercheurs de l'Université de Stanford, Marc Levoy et Pat Hanrahan, définissent une simplification de la fonction plénoptique plus adaptée aux applications concrètes¹. Celle-ci caractérise le flux de lumière dans un environnement non obstrué et avec un éclairage invariant; mais aussi une scène statique où t n'aurait aucune influence (par exemple, une photographie plutôt qu'une vidéo). En effet, cela permet de proposer une fonction plénoptique qui ne compte plus que quatre dimensions et qui est adaptée au traitement d'images.

¹ LEVOY M., HANRAHAN P. "Light Field Rendering". ACM Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1996, pp. 31-42.

La luminance d'un rayon lumineux étant la même de part et d'autre de celui-ci, sauf s'il est dévié ou obstrué, cela permet de caractériser une nouvelle fonction selon quatre paramètres. On imagine deux plans dans l'espace, dans lesquels on retiendrait deux coordonnées; cela suffit dans ce modèle pour définir le *light field*. On peut imaginer d'autres méthodes de représentation, telle qu'une sphère dont on connaîtrait l'intersection avec un rayon, par exemple.

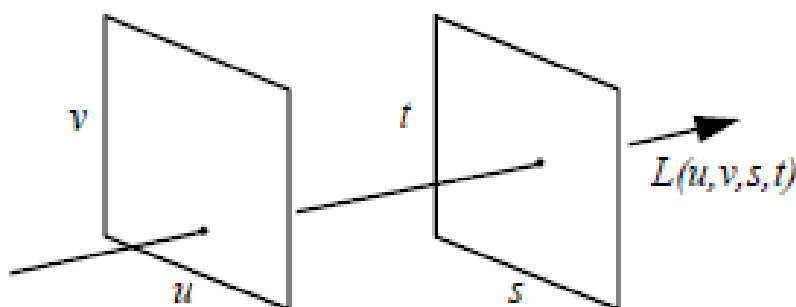


Figure 5 : Paramétrisation 4D de la nouvelle fonction: on définit deux plans différents et deux coordonnées cartésiennes dans chacun d'entre eux

Le principal intérêt de cette représentation est qu'elle a concrètement permis l'utilisation d'images. Si l'on imagine un objet placé face à un observateur, on peut arbitrairement déterminer deux plans dans lesquels placer les coordonnées nécessaires au traitement. Les possibilités des appareils plénoptiques que nous connaissons aujourd'hui ne sont pas encore décrites, mais cette proposition reste fondamentale dans l'application de la théorie du *light field*.

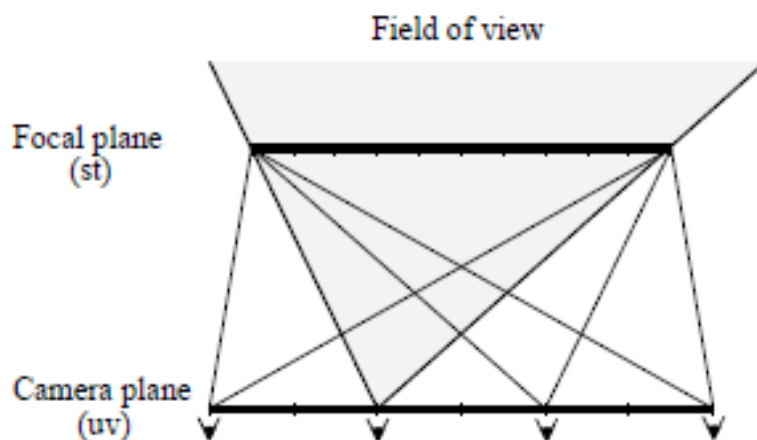


Figure 6 : Représentation simplifiée de la capture d'un *light field*. Le plan (st) est celui des microlentilles et le plan (uv) celui du capteur. La distance entre les deux est volontairement exagérée sur ce schéma; à noter que chacune de ces microlentilles recouvre plusieurs pixels (généralement, un carré).

Dans la plupart des modèles utilisés aujourd'hui, les deux plans de coordonnées nécessaires à la détermination du chemin des rayons lumineux sont définis selon le plan des microlentilles (s,t) et selon le plan du capteur (u,v) . Cela simplifie le traitement des données, car une fois la caméra calibrée et ses caractéristiques connues, ces dernières ne changeront pas selon d'autres critères exogènes (mouvement d'un sujet, changement dans la nature de la lumière, etc.)

I.2 - Histoire du relief

I.2.a - Méthodes primitives

I.2.a.1 - Principes et début du stéréogramme à parallaxe

Le stéréogramme à parallaxe est une méthode autostéréoscopique, c'est-à-dire que l'appréciation du relief ne nécessite pas le port de lunettes par l'observateur. Son principe consiste à prendre deux photos ou plus d'un sujet, de les découper en bandes, et de les placer dans un système d'observation qui alterne entre les bandes photographiques et des bandes opaques de même taille. Ainsi l'observateur perçoit le sujet sous différents angles en fonction de sa position, ce qui lui donne une impression de profondeur et de restitution réaliste du sujet. Ce procédé est assez rudimentaire, mais son ingéniosité et sa simplicité de réalisation lui valent d'être encore utilisé aujourd'hui pour des applications grand public.

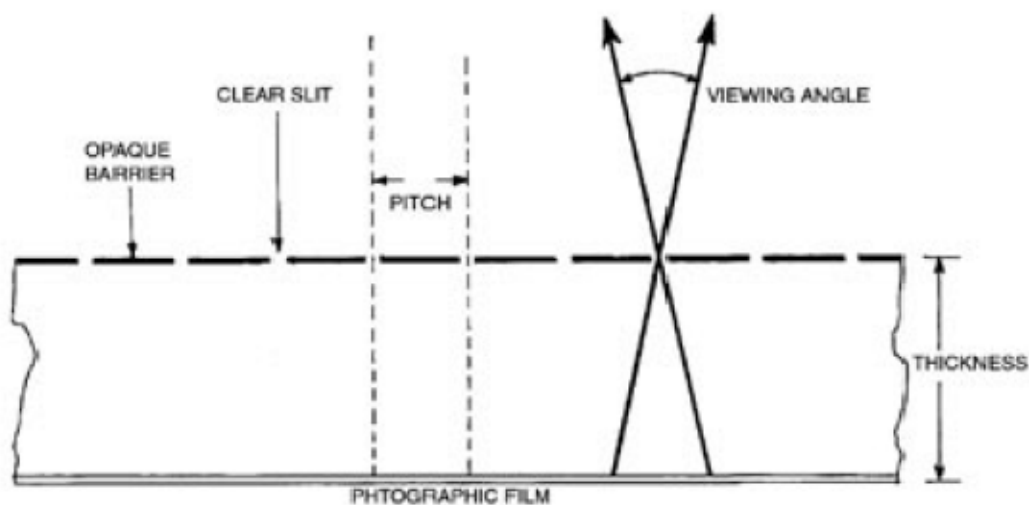


Figure 7 : Dispositif de prise de vue pour stéréogramme à parallaxe. Le film est placé derrière une suite de fentes régulièrement espacées afin d'obtenir plusieurs points de vue selon une translation sur un même film.

Les premiers modèles datent de la fin du XVII^e siècle avec les réalisations du peintre français Gaspard Antoine de Bois-Clair¹. Sa réalisation la plus remarquable est un double portrait du roi et de la reine du Danemark, Frederik IV et Louise de

1 ROBERTS D., SMITH T. The History of Integral Print Methods, un extrait de "Lens Array Print Techniques" http://www.integralresource.org/Integral_History.pdf, 2003.

Mecklenburg-Güstow. Sa technique consiste à peindre deux portraits distincts selon des méthodes conventionnelles, puis à les découper en lamelles qu'il place ensuite de manière alternée dans son tableau final. La disposition en accordéon permet alors de ne présenter qu'un seul portrait selon la position de l'observateur.



Figure 8 et 9 : La restitution voulue : le portrait du roi est visible depuis la gauche, et celui de la reine depuis la droite.



Figure 10 : Le portrait peint par G.A. Bois-Clair vu de face

C'est à la fin du XIXe siècle que deux photographes, Jacobson et Berthier, expérimentent cette technique à l'aide de films photographiques. Leurs résultats ne furent cependant pas probants, ils laissèrent alors derrière eux des explications qui intéressèrent Frederik Ives peu de temps après.

I.2.a.2 - Les apports de Frederick et Herbert Ives

C'est ensuite en 1903 que Frederick Ives, chercheur américain, dépose le brevet pour son modèle de stéréogramme¹. Il est le premier à formaliser le procédé scientifiquement et est suivi de près par le français Eugène Estenave de France. On peut noter aussi que Ives contribua aux recherches sur la photographie couleur.

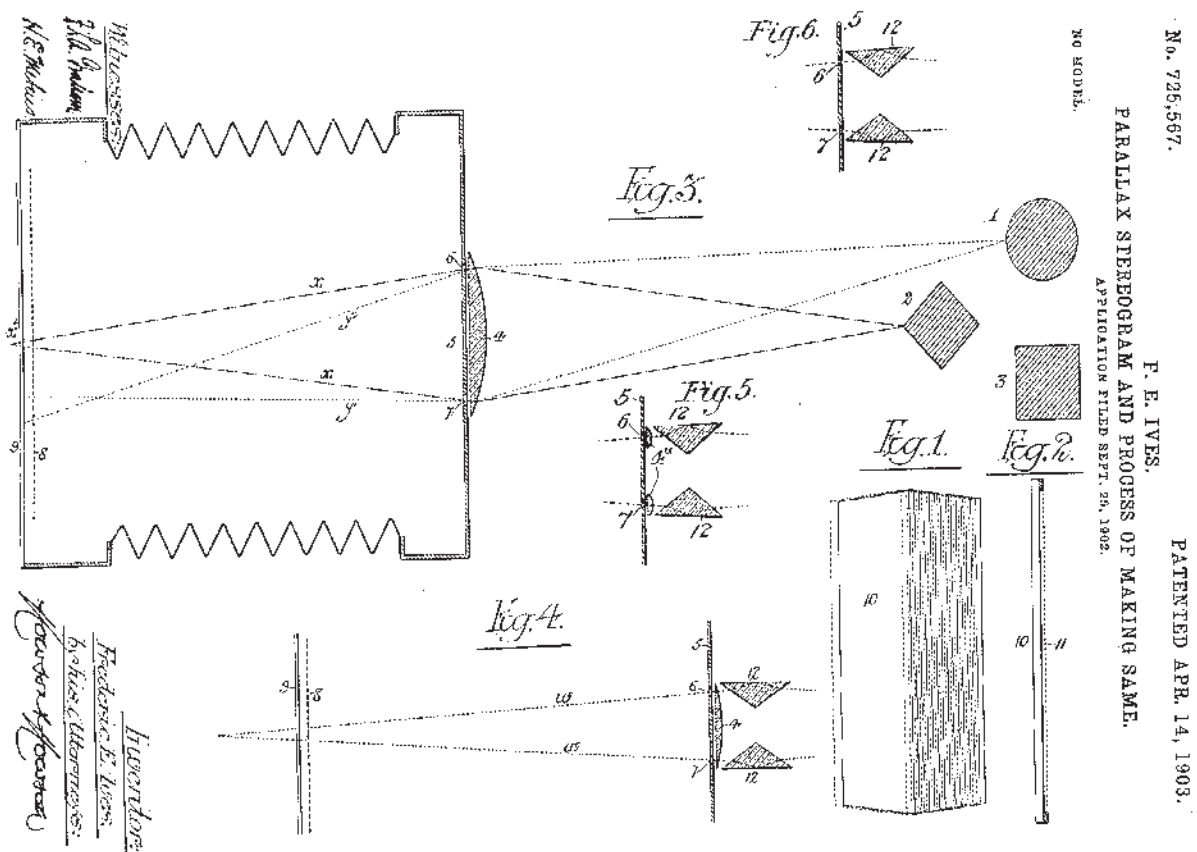


Figure 11 : Le brevet du stéréogramme de Frederick Ives, premier dispositif permettant de restituer des images en relief sans lunettes spécifiques. L'observation à travers les mêmes fentes servant à la captation donnait des points de vue différents à chaque oeil, et par conséquent une sensation de relief

¹ U.S. Patent 725,567, "Parallax Stereogram and Process of Making Same", application filed 25 September 1902, patented 14 April 1903

Son dispositif est composé de trois éléments : un masque constitué de plaquettes opaques séparées par de fines fentes moins larges, une plaque de verre permettant d'obtenir la distance nécessaire entre le masque et les images, et enfin l'émulsion photographique, divisée en différentes lamelles alignées derrière les ouvertures. Grâce à un jeu d'angles précis, l'observateur captait alors une image différente en chacun de ses yeux, conférant une impression de relief.

Le fils de Frederick Ives, nommé Herbert, a lui aussi participé aux recherches sur le relief dans les années 1930¹. Son principal apport concerna la prise de vue de ces images; là où ses pairs prenaient alors plusieurs photographies d'une même scène sous différents points de vue afin d'en assurer la restitution en relief, Herbert cherchait un moyen d'enregistrer toute l'information nécessaire en une seule image. Il appliqua donc le principe du masque du stéréogramme à l'appareil photo, en utilisant un masque régulièrement poinçonné avec un objectif de 30 centimètres de diamètre à une ouverture de $f/2$; on peut honnêtement qualifier cette invention de prémices des caméras plénoptiques modernes. Étant donné que son appareil n'utilisait qu'une translation horizontale de son système optique, il mit au point un dispositif à objectif rotatif, permettant l'utilisation de systèmes optiques moins encombrants et plus adaptés à la photographie.

Il faut ensuite attendre la fin des années 1980 pour que les publicitaires s'intéressent à ces inventions pour trouver une alternative aux simples affiches. Ce procédé fut essentiellement utilisé dans ce but aux États-Unis, avant d'être remplacé par des écrans environ quinze ans plus tard.

I.2.b - Méthodes intégrales

I.2.b.1 - Les fondamentaux de Gabriel Lippmann

Gabriel Lippmann, professeur à la Sorbonne, est principalement connu pour être l'inventeur de la méthode interférentielle pour la photographie couleur. Mais Lippmann a aussi mis au point une méthode de prise de vue qu'il qualifiait d'intégrale. C'est dans son discours à l'Académie des Sciences du 2 mars 1908, intitulé

¹ U.S. Patent 1,905,716, "Making stereoscopic parallax panoramagrams from pseudoscopic parallax panoramagrams", patented 25 April 1933

Epreuves Réversibles Donnant la Sensation du Relief, qu'il décrit ses découvertes. Son dispositif est connu pour être la première méthode directe de captation du relief, c'est-à-dire qu'il ne nécessitait qu'un seul objectif pour fonctionner¹.

Le chercheur propose une méthode où le collodion utilisé à l'époque pour créer les émulsions photographiques est pressé dans une sorte de moule à gaufre, afin d'y créer un relief selon ce qu'il décrit comme étant "*un grand nombre de petites saillies en forme de segments sphériques*". Ces reliefs font office de lentilles convergentes, et apportent ainsi de multiples points de vue de la scène photographiée, et Lippmann y fait d'ailleurs un parallèle avec le fonctionnement de l'oeil et du système visuel de certains insectes.

Une fois développé, son résultat peu être observé à l'oeil nu par transparence (avec un rétroéclairage) du côté antérieur à la surface sensible. Il proposa ensuite différentes méthodes alternatives de prise de vue, avec des émulsions cylindriques ou sphériques, dont le but était de capter une information encore plus large et d'augmenter l'impression d'immersion de l'observateur. Cependant Lippmann avait fréquemment des problèmes d'inversion de la profondeur avec son dispositif, où le premier plan devient le dernier et inversement. Ce défaut fut corrigé par Frederick Ives un peu plus tard, proposant une méthode de correction consistant à exposer l'image obtenue sur un autre film à travers un réseau de lentilles.

D'autres personnes se sont intéressées aux découvertes de Lippmann, dont le professeur Sokolov de l'Université de Moscou. Ce dernier simplifia le procédé en utilisant un masque en papier comportant de multiples ouvertures à la manière d'un sténopé. Un pas de plus vers l'appareil plénoptique moderne.

Eugène Estanave de France participa aussi aux recherches, en utilisant un système très imposant composé de 1250 lentilles de Stanhope; dispositif qu'il nomma d'ailleurs *caméra stanhopique*.

1 LIPPMANN G. "Epreuves réversibles donnant la sensation du relief", Académie des sciences, séance du 2 mars 1908.

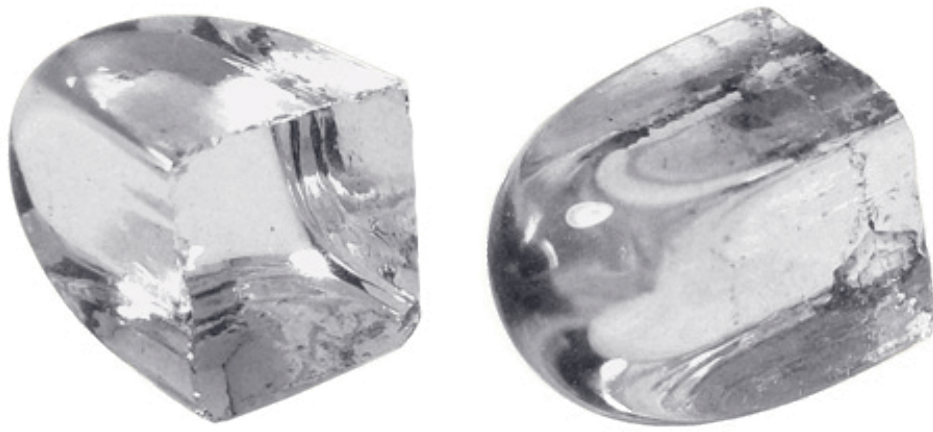


Figure 12 : La lentille de Stanhope. Cette lentille est en fait un prisme à section carrée, dont le foyer se trouve au niveau de sa surface plane. Popularisée par son utilisation en tant que loupe après la mort de son créateur, elle était parfois placée dans un tube rigide permettant d'isoler un sujet spécifique.

I.2.b.2 - Les apports ultérieurs de Maurice Bonnet

Maurice Bonnet est un photographe et inventeur français autodidacte. Il s'intéresse à la méthode interférentielle de Gabriel Lippmann dès 1931 et y apporte quelques améliorations¹. Il s'implique ensuite dans la photographie en relief en mettant au point un dispositif équipé de onze objectifs sur un plan horizontal et prenant autant de films différents. Cela lui permet de pallier au manque de luminosité inhérent aux systèmes lenticulaires primitifs de son époque. Il utilise ensuite le même dispositif pour projeter les images obtenues sur une surface photosensible à travers un réseau ligné, ce qui lui permet d'obtenir des résultats de grande qualité. Il est important de noter aussi que son dispositif lui permettait de capturer le mouvement d'un sujet et de le restituer.

Fort de ses nouvelles découvertes Maurice Bonnet voit ici une opportunité d'entreprise et fonde sa société nommée la Relièphotographie en 1937. La même année il met au point un dispositif similaire au précédent, mais disposant de trente-trois objectifs, et donc de beaucoup plus de possibilités quand à la finesse du relief. Bonnet portait beaucoup d'attention à la qualité de ce dernier, dans une optique d'utilisation de ses procédés pour la publicité il était persuadé, à juste titre, que l'immersion de l'observateur dans l'image était un aspect fondamental du procédé.

¹ TIMBY K. « *Images en relief et images changeantes* », Études photographiques, 9 Mai 2001, [En ligne], mis en ligne le 09 février 2005. URL : <http://etudesphotographiques.revues.org/246>. consulté le 09 mai 2015.

En 1940 Maurice Bonnet abandonne complètement ce procédé pour lui préférer un système à réseau de lentilles, permettant une meilleure exposition et une netteté améliorée. Son travail est reconnu et récompensé par son entrée au CNRS en 1961, où il crée un laboratoire de recherche sur le film gaufré et ses applications. Son appareil le plus abouti, basé sur une architecture de chambre photographique imposante, y est d'ailleurs encore conservé.



Figure 13 : Publicité élaborée par la société de Maurice Bonnet



Figure 14 : Maurice Bonnet derrière un de ses réseaux de lentilles

I.2.b.3 - Contributions supplémentaires au système intégral

Granont et Planovern¹, deux chercheurs français, étudièrent une méthode de photographie intégrale à l'aide d'un système de miroirs. Le sujet était placé devant un panel de miroirs orientés de façons légèrement différentes, puis l'opérateur capturait sa réflexion. En utilisant le même dispositif pour projeter l'image sur les miroirs, on obtenait alors une restitution en relief.

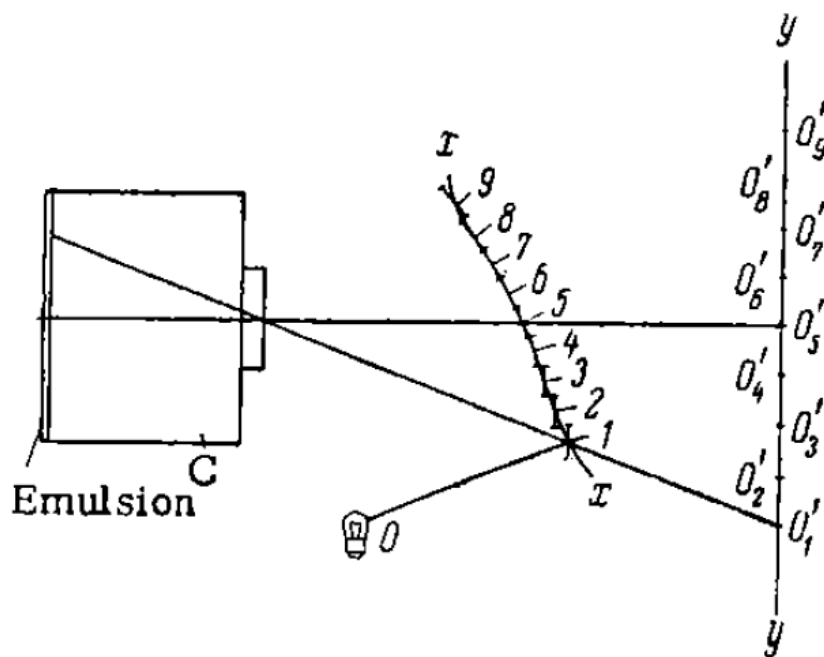


Figure 15 : Le système à miroirs de Granont et Planovern

En 1955, John Gruetzner², chercheur américain, dépose un brevet pour sa méthode. Celle-ci consiste à encoller un réseau de microlentilles en plastique à l'émulsion du film photographique, et ce dès sa fabrication. Il parvient ainsi à obtenir un produit contenant deux-cents lentilles par pouce.

À la même époque, Lesley Dudley³, lui aussi américain, s'intéressa à la nature des microlentilles utilisées. Ses études l'ont amené à conclure que l'ouverture de l'objectif principal et celle des lentilles internes devaient être liées afin d'éviter les recouvrements ainsi que les discontinuités. Il recommande l'utilisation d'une ouverture plus grande sur l'objectif que sur les microlentilles, afin que ces dernières ne soient pas limitées.

1 et 3 ROBERTS D., SMITH T. *The History of Integral Print Methods*, un extrait de "Lens Array Print Techniques" http://www.integralresource.org/Integral_History.pdf, 2003.

2 U.S. Patent 2,724,312, "Means for obtaining three-dimensional photography", patented 22 November 1955

Nov. 22, 1955

J. T. GRUETZNER

2,724,312

MEANS FOR OBTAINING THREE-DIMENSIONAL PHOTOGRAPHY

Filed May 7, 1952

2 Sheets-Sheet 1

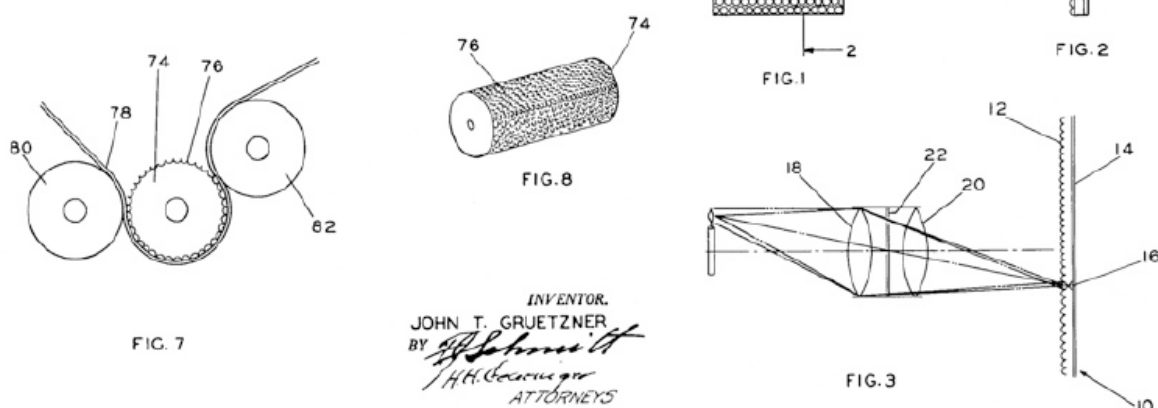


Figure 16 : Méthode de Gruetzner. L'encollage des microlentilles sur le film est alors une étape supplémentaire dans la production de l'émulsion.

À partir des années 1970 et pendant près de vingt ans, un groupe de recherche soviétique a entrepris de formaliser la photographie intégrale sous tous ses aspects¹. À la fin des années 1980, c'est à Sheffield, au Royaume-Uni, qu'un groupe de recherche commence à s'intéresser aux procédés, développant différentes méthodes et systèmes optiques plus modernes. C'est dans les années 1990 que les universités américaines, notamment Stanford et le MIT, développent un intérêt pour ce domaine, rejoignant ainsi les théories du *light field* explicitées un peu plus tôt.

I.2.c - Relief et cinéma

I.2.c.1 - Historique du cinéma en relief

Sans passer par une description de l'histoire du cinéma au sens large, il est néanmoins important de décrire les techniques utilisées par les opérateurs dans la production d'images en relief.

Il faut remonter en 1858 pour trouver les prémices du cinéma en relief. C'est au cours de cette année que Joseph Charles Almeida, scientifique proche de Gabriel

1 ROBERTS D., SMITH T. *The History of Integral Print Methods*, un extrait de "Lens Array Print Techniques" http://www.integralresource.org/Integral_History.pdf, 2003.

Lippmann et connu pour être le fondateur de la Société Française de Physique, présente à l'académie des sciences un dispositif reposant sur les principes de l'anaglyphe¹. Son installation consistait à projeter deux vues stéréoscopiques d'une même scène à l'aide de deux lanternes respectivement rouge et verte, et ce de façon alternative. Les spectateurs portaient des lunettes teintées de façon adéquate (là aussi, rouges et vertes) et la projection se devait d'être suffisamment rapide pour que la sensation de relief se produise, de plus son dispositif était assez imposant, mais les résultats obtenus furent remarquables en plus de constituer les fondements de l'anaglyphe.

Louis Arthur Ducos du Hauron, connu pour l'invention du procédé trichrome, reprendra le travail de Joseph Charles Almeida quelques années plus tard. Il parviendra alors à superposer l'impression des deux images selon des teintés rouge et bleu, en utilisant des lunettes similairement teintées. Il obtient des résultats concluants et des retours très positifs, qui l'amènent à breveter son invention par la suite.

C'est ensuite en 1897 que Claude Grivolas, inventeur français, participa de façon significative au cinéma en relief. En effet ce dernier mit au point une caméra reposant sur les principes de l'anaglyphe de Ducos du Hauron. Son dispositif comportait deux bobines elles-mêmes placées après deux objectifs distincts séparés d'une distance proche de l'écart interpupillaire. Un tel enregistrement permet alors de projeter des images animées en relief en utilisant deux projecteurs alignés et surmontés de lentilles respectivement rouge et bleu.

Il faut ensuite attendre 1932 pour qu'une avancée majeure se produise dans le domaine. C'est cette année-là qu'Edwin Herbert Land, cofondateur de la société Polaroid, dépose un brevet pour ce qu'il nomme un "Filtre Polaroid". Ces interfaces sont en réalité des filtres de polarisation rectilignes, permettant alors de restituer une scène en relief tout en conservant ses couleurs, démarche encore inédite à l'époque. Cependant les premiers films couleur ne furent disponibles qu'en 1935, ce qui retarda l'impact de cette découverte. La première projection fut au Centre

1 HAYES J. "You see them WITH glasses!"... A Short History of 3D Movies, Widescreen Movies Magazine, mis en ligne le 9 juin 2002 et mis à jour le 14 septembre 2014. URL : <http://widescreenmovies.org/WSM11/3D.htm>. Consulté le 09 mai 2015.

des Techniques de Berlin, en 1936, sur un écran métallique afin de conserver la polarisation des images.

Après la Seconde Guerre mondiale, la production professionnelle de films en relief débuta aux États-Unis. Le premier succès, *House of Wax*, date de 1953, sur fond d'incendie et de meurtres dans un musée de cire. Le film fut tourné avec un des premiers rigs conçu à Hollywood à cet effet, nommé Natural Vision. Ce support de caméra avait pour qualité d'être très léger pour son époque, et présentait



Figure 17 : Affiche de *House of Wax* vantant les mérites du cinéma en relief.

aussi une excellente flexibilité.

Différents formats de pellicule seront inventés pour optimiser le rendu du relief au cinéma, mais seul l'IMAX est parvenu à s'imposer. Avec une image de 70mm de diagonale et à défilement horizontal, les inventeurs de ce format ont su l'imposer comme standard à l'industrie du cinéma. Bien que peu connu en France, ce procédé est encore beaucoup utilisé en Amérique du Nord où les salles spécialisées sont nombreuses.

Depuis l'invention d'Edwin Herbert Land, l'industrie du cinéma n'a pas connu d'invention majeure en matière de captation du relief¹. Les rigs pour

1 HAYES J. "You see them WITH glasses!"... A Short History of 3D Movies, Widescreen

supporter deux caméras sont devenus plus précis et contrôlables, notamment avec l'utilisation d'un miroir semi-transparent permettant une nouvelle disposition des caméras. Il est important de noter aussi que les filtres polarisants utilisés à l'heure actuelle sont dits circulaires, à différencier des précédents alors rectilignes. Cela permet une restitution du relief plus précise et un visionnage qui n'est pas altéré par l'orientation des lunettes, permettant aux spectateurs de bouger la tête sans craindre l'occultation d'une image.

I.2.c.2 - Méthodes du cinéma en relief et potentiels apports du plénoptique

La méthode primitive du cinéma en relief est l'anaglyphe. Son fonctionnement repose sur la restitution de deux images superposées et de couleurs complémentaires, le plus souvent rouge et cyan. La captation de telles images se fait avec deux caméras décalées selon un entraxe censé représenter la distance interpupillaire, puis la restitution s'effectue en colorant chacune des images. Le décalage entre les sources rouge et bleu n'est pas le même partout dans l'image; ce dernier diminue avec la sensation de distance à l'objet, si bien qu'un élément proche du plan de restitution (écran, feuille, etc.) présentera un décalage entre ses deux sources très faibles. L'anaglyphe est une méthode relativement simple à mettre en oeuvre et peu coûteuse, mais sa restitution des images couleur est de mauvaise qualité étant donné l'utilisation de filtres colorés pour l'observation.

En matière de procédés plus récents, on compte la méthode stéréoscopique par alternance. Son principe consiste à projeter les deux points de vue de manière alternée, en faisant porter à l'utilisateur des lunettes à cristaux liquides occultant l'oeil à qui l'image projetée n'est pas destinée. La synchronisation se fait généralement par déclenchement infrarouge et doit être très précise pour que le procédé fonctionne. Cette méthode requiert l'utilisation de système offrant une restitution d'au moins 120 Hertz pour un écran et de 144 Hertz en projection compte tenu de la nécessité de doubler le nombre d'images. De plus, les lunettes utilisées ici sont parfois inconfortables, et leur utilisation peut être source de fatigue oculaire chez les personnes sensibles au scintillement.

Movies Magazine, mis en ligne le 9 juin 2002 et mis à jour le 14 septembre 2014. URL : <http://widescreenmovies.org/WSM11/3D.htm>. Consulté le 09 mai 2015.

La technique la plus utilisée est celle à polarisation, aussi appelée “3D passive”. La captation se fait grâce à deux caméras, de la même manière que dans les cas précédents. La restitution se fait ensuite, dans le cas d’une projection, avec deux projecteurs alignés et polarisés, le tout sur un écran métallisé afin de ne pas perdre la polarisation des images. Les spectateurs portent des lunettes aux verres polarisés de la même façon afin de diriger les images vers l’œil qu’elles sont censées atteindre. Cette méthode est la plus répandue, car elle est moins coûteuse que la précédente, seul l’écran représente un investissement, et aussi, car le port de ces lunettes est nettement plus confortable pour l’utilisateur; malgré ses défauts comme la présence d’artefacts fantômes ou encore la neutralité des filtres posant des problèmes de perception des couleurs.



Figure 18 : Rig Binocle à miroir équipé de deux caméras

Quant à la captation des images en relief, les caméras plénoptiques présentent l’avantage d’avoir un dispositif d’enregistrement unique. En effet, la nécessité d’utiliser deux caméras lors des tournages mène à des installations sur

rig souvent lourdes, encombrantes, et donc difficilement manipulables. De plus, un tel matériel est nécessairement coûteux, car le besoin de précision est élevé, aussi, car deux caméras et deux objectifs sont requis.

En plus de présenter une alternative moins coûteuse et plus facilement utilisable, les caméras plénoptiques ont des possibilités à offrir en matière de restitution par rapport au flou, à la profondeur de champ, et au jaillissement. Cependant, leur utilisation à l'heure actuelle ne semble pas viable étant donné que la captation vidéo est assez complexe en dehors d'un environnement complètement maîtrisé (comme un laboratoire). Il est aussi très important de préciser que cette technologie est entièrement compatible avec les écrans autostéréoscopiques lenticulaires, contrairement aux systèmes basés sur des caméras standards.

II - L'image plénoptique et son rapport au flou

II.1 - La technologie du *light field*

II.1.a - Principes théoriques

II.1.a.1 - Bases générales

L'idée principale à la base du *light field* est la possibilité d'explorer une scène précédemment enregistrée en la restituant fidèlement. De nombreuses techniques existent alors pour déterminer interpolation et correspondance entre différentes vues d'un même sujet.

La création d'un *light field* peut avoir différentes origines. Les premières recherches en informatique graphique utilisaient un logiciel de 3D couplé à d'importants calculs de lancer de rayon¹. Cette méthode requiert une puissance considérable, mais présente l'avantage de fournir des données très complètes. En effet, un tel objet offre ensuite la possibilité à l'utilisateur une totale liberté de choix concernant son point de vue sur la scène. Étant donné que l'objet ici créé contient toutes les informations propres aux rayons lumineux, la fonction plénoptique 4D (selon les deux plans (s,t) et (u,v)) présentée précédemment devient alors applicable. Schématiquement, on dispose ici d'un espace 4D, duquel nous pouvons extraire des tranches 2D, qui sont simplement des images.

La différence qu'il est important de noter ici pour comprendre la suite est que cette tranche est influencée par le reste de son environnement. Une image prise par résonance magnétique (IRM) propose des vues à différentes profondeurs de l'intérieur d'un objet, exactement comme si on le tranchait. Une tranche dans un *light field* prend en compte le trajet des rayons lumineux, à la manière d'une photographie.

¹ Le lancer de rayon, de l'anglais ray tracing, est une technique de simulation du parcours de la lumière. Son rendu est dit inverse, car le calcul du chemin de rayons commence au niveau de la caméra vers les objets, puis en direction de la source lumineuse. Cette méthode est aussi bien utilisée en synthèse d'image qu'en analyse de systèmes optiques et propose des scènes de grand réalisme.

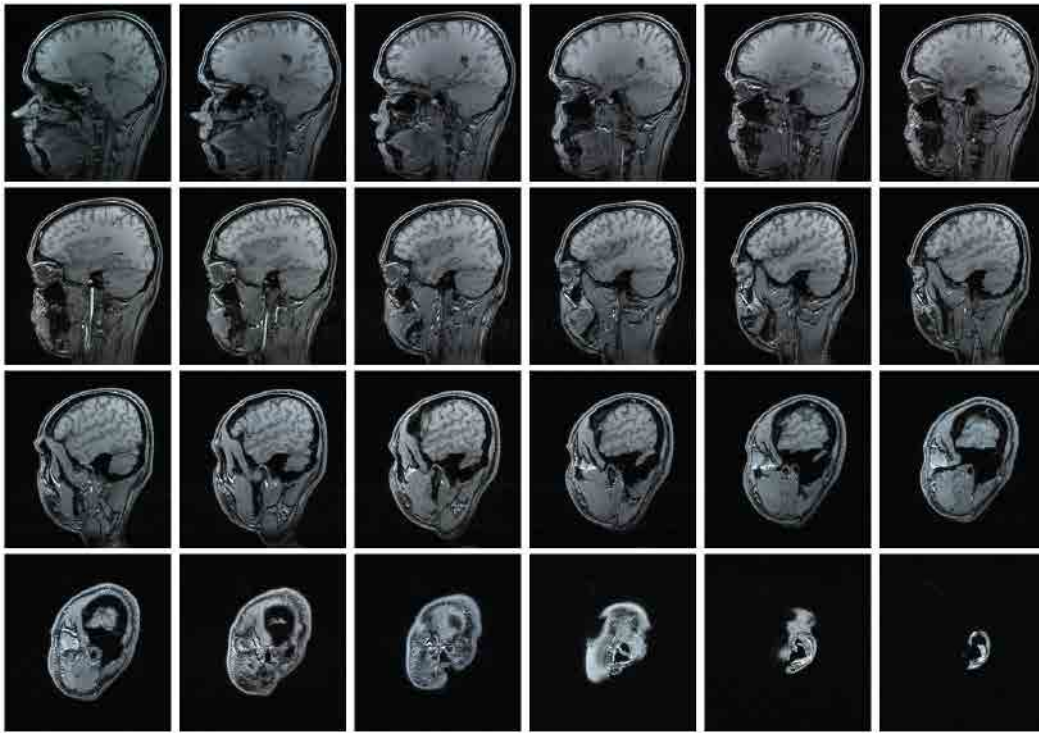


Figure 19 : Exemple d'une image par IRM, on observe ainsi le cerveau du sujet par tranche, de la même manière que si on le tranchait physiquement

Une autre méthode de synthèse d'un *light field*, arrivée plus tard dans les recherches scientifiques et qui a mené aux caméras plénoptiques, est possible à partir de simples photographies. La théorie à l'origine de ce procédé décrit notre environnement comme un *light field* dont nous pouvons extraire des tranches 2D, soit des images standards. En prenant de nombreuses photographies d'un même sujet il est possible de reconstituer un *light field* utilisable selon les mêmes caractéristiques que le cas précédent. Ces images peuvent être prises en modifiant deux critères : le point de vue et la distance de mise au point.

Il est important de comprendre que différentes tranches 2D d'un *light field* 4D s'apparentent pour notre utilisation à un ensemble d'images avec diverses distances de mise au point. Si l'on est familier des caméras plénoptiques, on voit ici les prémices d'une de leurs possibilités, à savoir refaire le point après la prise de vue; à noter cependant qu'en terme d'information il n'est pas nécessaire d'avoir des images à différentes mises au point pour pouvoir la modifier *a posteriori*. En effet, la présence de plusieurs points de vue permet déjà cela, et différentes mises au point enrichiraient l'information en n'utilisant que les pixels correspondant aux lentilles nettes pour une profondeur donnée.

II.1.A.2 - Principe optique

L'utilisation des *light fields* à partir de photographies faisant l'objet d'un intérêt grandissant, la communauté scientifique s'est alors concentrée sur le sujet. Produire un ensemble d'images d'un même sujet n'est pas une démarche complexe, cependant cette méthode implique un delta-temps qui rend l'opération impossible si un objet est mouvant, si l'éclairage venait à être modifié, ou encore si les caractéristiques du dispositif de prise de vue n'étaient pas constantes. En effet, les algorithmes de traitement ont besoin de conditions de prise de vue à la stabilité extrême, d'où la nécessité d'un dispositif capturant toute l'information à un instant précis.

Comme exposé dans la partie précédente, les réseaux lenticulaires semblent les plus adaptés à un tel besoin; un système multiobjectif représentant un coût trop élevé. De plus, un système lenticulaire permet d'obtenir plus d'informations sur la direction des rayons lumineux que tout autre dispositif connu aujourd'hui.

Les dispositifs plénoptiques présentent donc un réseau de microlentilles placé devant leur capteur, chacune d'entre elles recouvrant un échantillon de photosites (carré, hexagone, cercle approximatif...). Cette disposition permet de séparer des rayons lumineux qui viendraient s'agglutiner en un même photosite dans le cadre d'un dispositif de prise de vue conventionnel. Par conséquent, en connaissant simplement les propriétés optiques de ces lentilles, il devient possible de déterminer l'origine de ces rayons relativement à celui qui est central et donc non dévié.

Schématiquement, en prenant en compte seulement les pixels centraux des microlentilles, on dispose de l'image là avec une ouverture différente (voir le schéma page suivante pour de plus amples explications). En revanche, si l'on utilise un autre pixel, on aura alors une image de la scène dont l'ouverture sera différente dans le plan (u,v) ; le point de vue sera donc différent de celui préalablement choisi. Ainsi, une image capturée avec un dispositif plénoptique n'est pas vraiment observable sans traitement, mais contient cependant bien plus d'informations qu'une simple photographie.

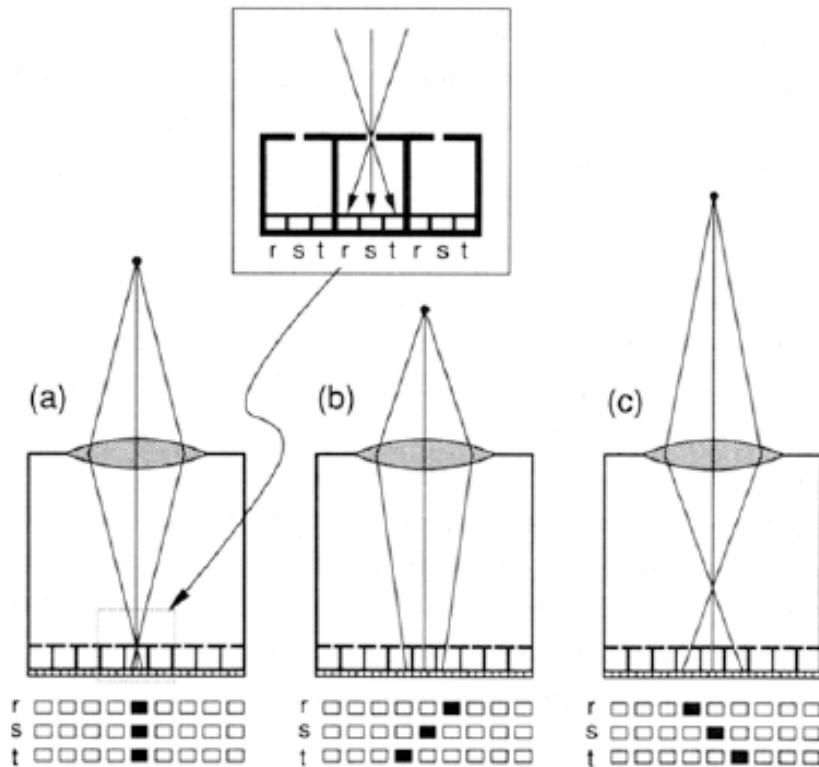


Figure 20 : Schéma illustrant le principe des microlentilles, où chacune d'entre elles recouvre un carré de neuf photosites. On distingue la répartition des rayons en fonction de la distance au sujet. À noter que cette représentation est faite en coupe pour simplifier l'explication et qu'elle ne serait pas optiquement rigoureuse sinon

Il faut imaginer chaque microlentille comme étant un dispositif à part entière, on peut même les décrire comme étant un réseau de sténopés. On peut ainsi assimiler un appareil plénoptique à un ensemble de dispositifs à la définition réduite, résultant en une mosaïque de différents points de vue. C'est précisément cet aspect qui permet les nombreuses possibilités offertes par cette technologie.

II.1.a.3 - Traitement et algorithmes

Le traitement de telles images est bien évidemment une étape essentielle pour en permettre une observation plus conventionnelle. Dans la suite de cette explication, l'image finale observable a pour nombre de pixels le nombre de microlentilles du dispositif. Ainsi, chacune d'entre elles représente un seul et unique pixel de l'image résultante, peu importe la nature de l'algorithme utilisé.

La première possibilité est de prendre un seul pixel par microlentille. Le

pixel central correspond au point de vue conventionnel de notre dispositif et ses voisins à des observations décalées selon une parallaxe verticale ou horizontale. C'est notamment grâce à ces différents points de vue que l'on peut en extraire des données relatives à la profondeur.

La seconde possibilité consiste à faire des moyennes de pixels au sein d'une même microlentille (c'est-à-dire de les additionner et de diviser la valeur obtenue par leur nombre). En moyennant les pixels on parvient à modifier les déformations induites par l'objectif, permettant d'aller du grand angle à l'objectif télécentrique¹, et ce dans la limite de couverture des microlentilles (on est sinon sujet au vignettage).

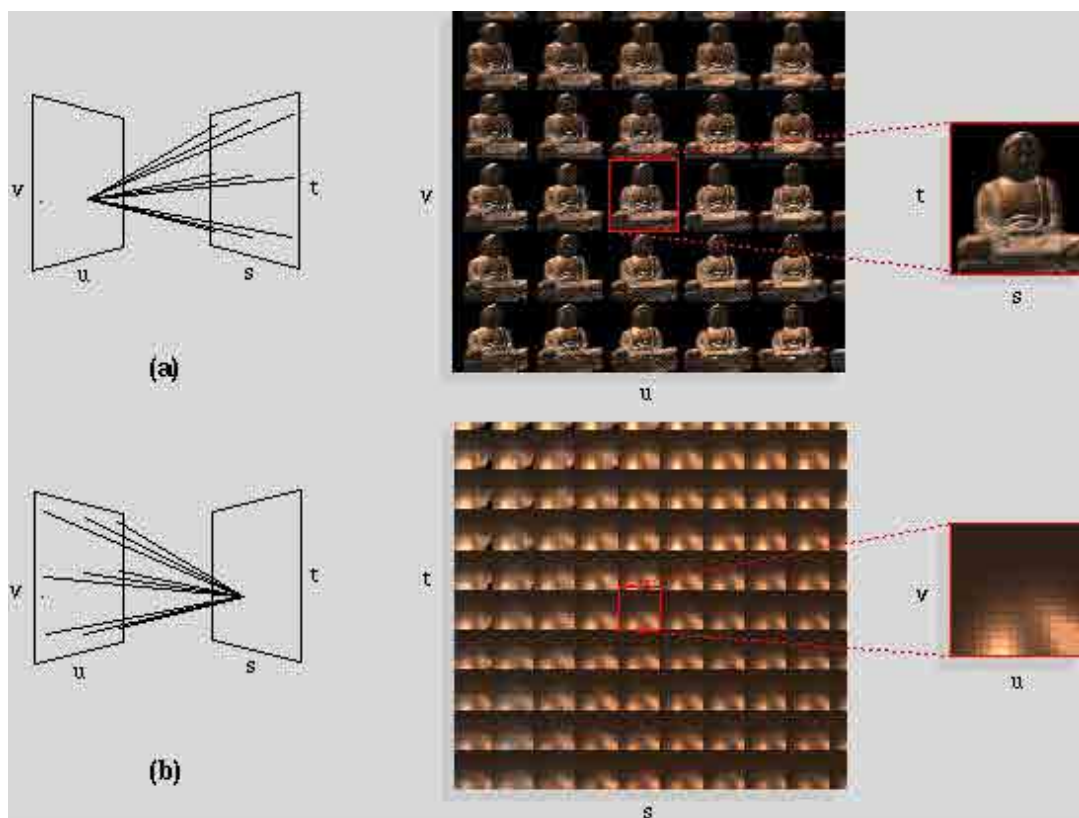


Figure 21 : Représentation de l'image plénoptique selon le système (s,t) , (u,v) . L'image au-dessus est représentée selon le plan des microlentilles, montrant ainsi les différents points de vue (les différentes ouvertures) sur le sujet. La seconde image est celle enregistrée par le capteur, nécessitant une exploitation avant d'être observable.

On peut aussi imaginer beaucoup d'autres applications étant donné que ces images contiennent une quantité considérable d'informations. Une utilisation très

¹ Un objectif dit télécentrique présente la particularité de ne projeter que des rayons parallèles à l'axe optique, formant ainsi des images sans déformations dues aux perspectives.

courante et pour laquelle les dispositifs plénoptiques se sont fait connaître auprès du grand public est la possibilité de faire la mise au point *a posteriori* de la prise de vue. La première étape consiste à déduire une carte de profondeur des différents points de vue; ce fichier décrit simplement la distance aux différents éléments de la scène, son calcul est possible dès qu'on dispose de données stéréoscopiques. La seconde étape est l'utilisation de cette carte comme masque sur notre image, avec l'application d'un filtre de flou dont la présence est corrélée aux valeurs de la carte de profondeur.

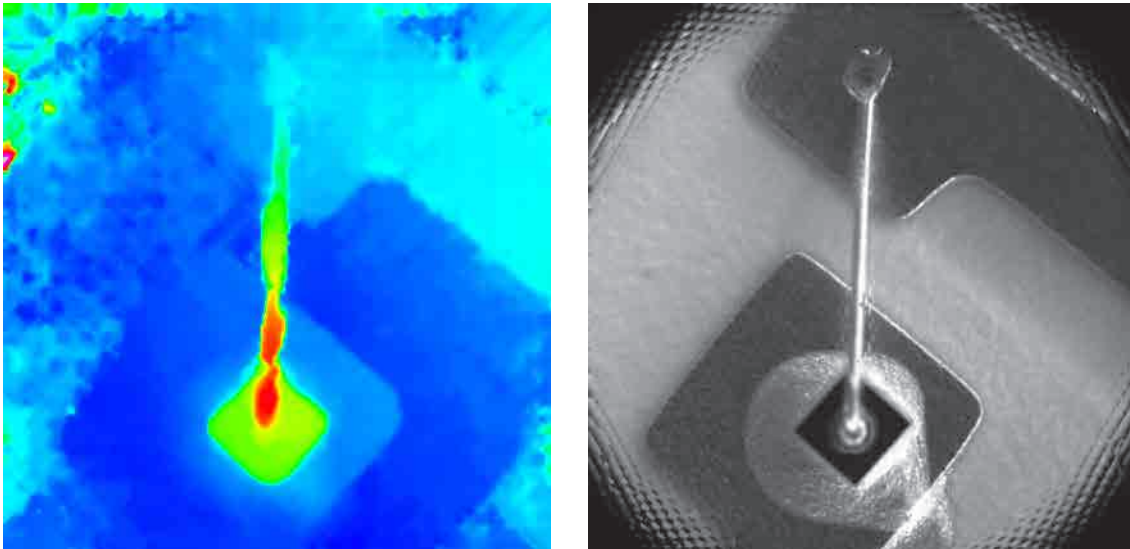


Figure 22 : Exemple de carte de profondeur, le bleu est lointain, le vert intermédiaire, et le rouge proche.

II.1.b - Évolutions des dispositifs

II.1.b.1 - Apports de Stanford

L'Université de Stanford, en Californie, fut pionnière en matière de recherche au sujet du *light field*. Le groupe de recherche en informatique graphique, et plus particulièrement l'équipe dirigée par le professeur Marc Levoy, ont grandement contribué au développement des dispositifs plénoptiques, convaincus de l'intérêt que ces derniers présentaient.

Le premier apport notable de cette équipe concerne le rendu basé image¹

¹ Le rendu basé image est une méthode d'informatique graphique permettant de synthétiser des objets 3D ou des images 2D à partir d'images 2D. Son principal intérêt est d'être plus rapide que l'utilisation de données 3D dans lesquelles la complexité de la géométrie influence le temps de calcul.

nommé *light field rendering*¹. Cette méthode consiste à prendre plusieurs vues d'un sujet et d'interpoler des vues intermédiaires en utilisant un modèle de description des rayons lumineux (le *light field*) et sans se soucier de la géométrie en trois dimensions de cet objet. Comme expliquée succinctement dans la partie précédente, cette nouvelle approche permet de déduire des vues aux perspectives corrigées en interprétant le sujet dans un repère en quatre dimensions, et dont une nouvelle vue serait l'extraction d'une tranche 2D de cet espace. Hypothétiquement, il est possible de cumuler l'utilisation d'un modèle 3D et d'images pour l'exploitation d'un *light field*, auquel cas un nombre bien moindre d'images est nécessaire pour une visualisation correcte.

Alors que l'étape précédente permet à l'observateur de se déplacer autour de l'objet photographié et éventuellement de zoomer sur un détail de celui-ci, l'équipe de Stanford est allée plus loin. En effet, là aussi évoqué précédemment, leur méthode offre la possibilité de changer les déformations induites par l'objectif, et donc les perspectives, sans pour autant changer l'angle de vue². La caractéristique la plus intéressante étant l'extraction de vues dites télécentriques, où les perspectives n'induisent aucune distorsion. Cette étape est fondamentale, car elle contribue à l'intérêt de l'utilisation des *light fields* et permet potentiellement leur utilisation dans le cadre d'une application à la microscopie.

II.1.b.2 - Système plénoptique avec focus

Cependant Stanford n'est pas le seul acteur du domaine. Todor Georgiev, actuellement ingénieur au sein de l'entreprise Qualcomm et précédemment chez Adobe, a contribué de manière fondamentale à l'optimisation de ces dispositifs.

Son système se base sur un principe optique légèrement différent de l'original. En principe, l'objectif principal du dispositif est focalisé sur le plan des microlentilles, là où serait le capteur ou bien le film sur un appareil conventionnel. Le capteur du dispositif est placé au foyer image des microlentilles qui elles reçoivent leurs rayons de l'infini, définissant ainsi une relation de conjugaison.

1 LEVOY M., HANRAHAN P. "*Light Field Rendering*". ACM Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1996, pp. 31-42.

2 NG R., LEVOY M., BREDIF M., "*Light Field Photography with a Hand-Held Plenoptic Camera*." Stanford University Computer Science Tech Report CSTR, février 2005.

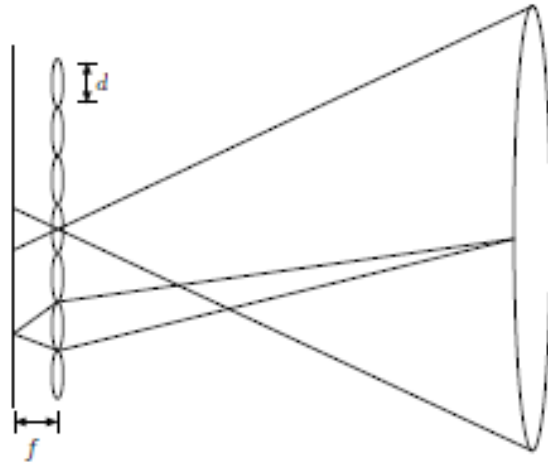


Figure 23 : Le système plénoptique originel, les micro-lentilles focalisent sur le capteur.

L'apport des micro-lentilles représente donc seulement une information sur la répartition angulaire des rayons lumineux.

Le modèle de Todor Georgiev, nommé *plenoptic 2.0*, propose de focaliser les micro-lentilles sur le plan focal image de l'objectif principal¹. Ainsi, les micro-lentilles se comportent réellement comme des sous-ouvertures de l'objectif, envoyant une image nette et observable sur le capteur, contrairement au cas précédent où les pixels de chaque lentille ont besoin d'être moyennés avant de permettre une observation par l'utilisateur. Un autre intérêt de cette approche est que, précédemment, une micro-lentille capture une position unique, alors qu'on dispose ici d'un certain

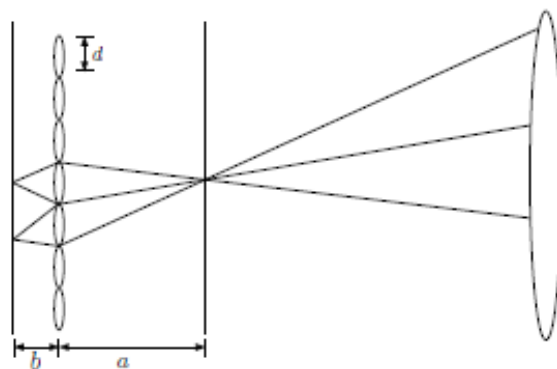


Figure 24 : Le système plénoptique de Todor Georgiev, les micro-lentilles reçoivent leurs rayons du plan focal image de l'objectif principal

¹ GEORGIEV T., LUMSDAINE A. "The Focused Plenoptic Camera", ICCP, April 2009.

recouvrement entre elles, ce qui permet une meilleure résolution angulaire et donc un *light field* mieux défini.

Un autre apport notable de Todor Georgiev au plénoptique est l'utilisation de différentes microlentilles sur un même capteur, système appelé *multifocus*. Couplé aux bons algorithmes de traitement, ce système offre une profondeur de champ exploitable accrue et une résolution angulaire encore plus importante.

II.1.b.3 - Système à ouverture codée

La dernière étape en matière d'apports sur les dispositifs plénoptiques concerne ce qui est plus connu sous le nom d'ouverture codée, ou encore ouverture synthétique. Sur n'importe quel dispositif de prise de vue, l'ouverture correspond à la taille du diaphragme; typiquement, plus l'ouverture est importante et moins la profondeur de champ le sera.

L'apport intéressant ici est le suivant : un objet plus petit que l'ouverture ne sera pas visible dans l'image¹. Par conséquent, pour une ouverture suffisamment importante, on parvient à retirer des objets qui en théorie occulteraient les parties du champ disposées après eux. De plus, un dispositif plénoptique dispose d'une information angulaire que n'a pas un appareil standard, ce qui implique la possibilité de "traverser" un élément occultant un autre avec une ouverture moindre. Ce principe est très utile en microscopie ou en surveillance, par exemple pour voir à travers un buisson ou bien une cellule qui ne serait pas complètement opaque et où plusieurs points de vue seraient nécessaires pour observer un objet en aval de celui-ci. Les dispositifs plénoptiques sont donc particulièrement adaptés à ce type d'application (une explication illustrée à ce sujet est aussi réalisée ultérieurement dans ce mémoire au sujet de l'application à la microscopie).

1 VAISH V. et al. "Synthetic Aperture Focusing using a Shear-Warp Factorization of the Viewing Transform", IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 2005, Vol. 3, p.129.



Figure 25 : Exemple d'application avec un *light field* de haute résolution : la mise au point est faite sur le buisson, puis sur les personnes se trouvant derrière, et enfin sur le bâtiment au fond.

II.1.c - Recherche expérimentale et avenir de la technologie

II.1.c.1 - Le *light field* dans les recherches plus récentes

Bien que les dispositifs de prise de vue plénoptiques soient maintenant fonctionnels et offerts au grand public, la recherche sur le *light field* n'est pas pour autant sur le déclin. De nombreuses applications, à différents niveaux théoriques, sont possibles et suscitent encore un fort intérêt.

Une des premières méthodes est le système de *light field* non structuré proposé par des chercheurs du Massachusetts Institute of Technology¹. Ce modèle permet de capturer et synthétiser des *light fields* avec un dispositif de prise de vue conventionnel (reflex numérique, caméra vidéo...) et sans imposer à l'utilisateur de lourdes contraintes dans la manipulation du dispositif. Grâce à différentes techniques algorithmiques de vision par ordinateur, le système parvient à calculer l'orientation de l'appareil de capture pour chaque image, ainsi que sa position et sa distance au sujet. Grâce à ce procédé, on peut obtenir l'intersection des différents rayons lumineux et ainsi en déduire un *light field* à part entière et en temps réel si l'on travaille connecté à un ordinateur. Cette approche est particulièrement novatrice de par le caractère non structuré des données d'entrée, ouvrant la porte à une utilisation des *light fields* nécessitant un contrôle moindre de la part de l'utilisateur.

¹ DAVIS A., LEVOY M., DURAND F. 2012. *Unstructured Light Fields*. Comp. Graph. Forum 31, 2pt1 (May 2012), 305-314

D'autres approches notables apparaissent aussi en se cherchant des applications concrètes. L'Université de Konstanz, en Allemagne, travaille sur des projets de super-résolutions angulaire et spatiale, qui permettraient à terme d'extraire des modèles 3D plus résolus et donc plus réalistes, ainsi que sur la calibration métrique des dispositifs, permettant par exemple d'estimer des distances ou des volumes. L'Université de Stanford, aux États-Unis, travaille quant à elle sur des procédés de correction du flou de bougé ou de mouvement par déconvolution¹, procédé dont l'efficacité est décuplée par l'abondance d'information contenue dans le *light field*.

II.1.c.2 - Des applications potentielles à l'avenir

Certaines méthodes sont plus expérimentales, mais prometteuses, notamment en matière d'applications pour le grand public. La capture et la synthèse de light fields étant un sujet maintenant maîtrisé, la restitution s'affirme comme le thème d'étude à venir.

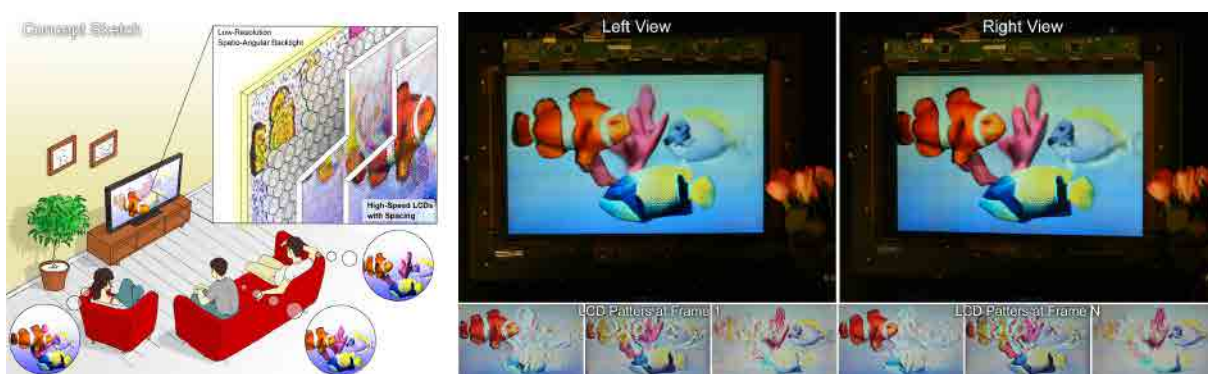


Figure 26 : Fonctionnement d'un écran tomographique dans le cas d'une application au relief

Une technique de restitution à l'étude est appelée "écran tomographique". Elle consiste à créer un écran en plusieurs couches translucides éclairées par une source uniforme et donnant la sensation de relief, le tout sans lunettes². Ce système est comparable à la visualisation d'un hologramme dans la nature de sa restitution. Il est important de préciser qu'il est donc possible de créer de tels périphériques

1 La déconvolution est une technique de traitement du signal consistant à annuler les effets d'un signal sur un autre (par exemple, le flou, ou encore le bruit). Plus le signal à corriger est connu, plus l'effet de cette opération est bon.

2 WETSZTEIN G. et al. "Tensor Displays: Compressive Light Field Synthesis using Multilayer Displays with Directional Backlighting", SIGGRAPH, ACM Transactions on Graphics, 2012, Vol.31, n.4. 2012.

à partir de dalles LCD superposées, et que cette technologie ne nécessite pas par conséquent un nouveau type d'écran à part entière.

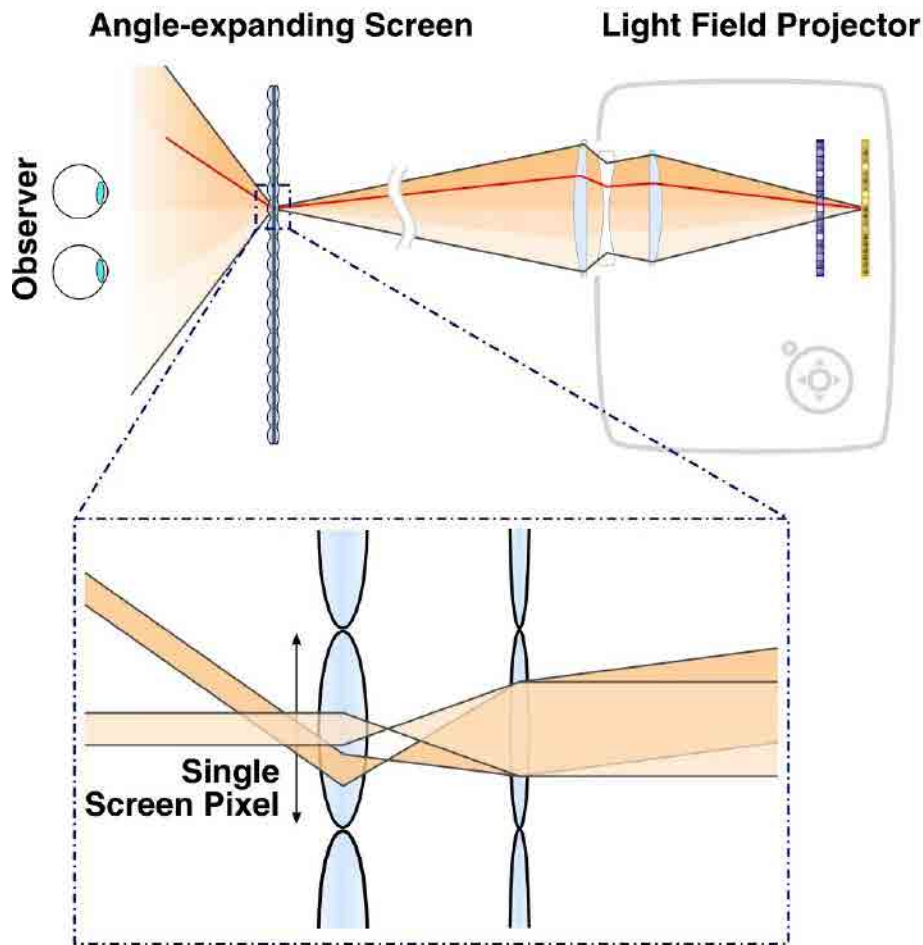


Figure 27 : Le système de projection autostéréoscopique : la lumière projetée est dirigée et vient rencontrer un écran lenticulaire qui offre à l'observateur différents points de vue selon sa position. À noter qu'un tel dispositif ne pourrait fonctionner avec des données stéréoscopiques brutes acquises à partir de deux caméras vidéo conventionnelles.

Un autre point d'intérêt est bien sur l'écran lenticulaire, dont le rapport direct avec le périphérique d'acquisition n'est désormais plus fictif. Il est aussi possible de cumuler la technologie précédente avec un réseau de lentilles, résultant en un dispositif aux angles de vue plus large et à l'épaisseur amoindrie. La société française Alioscopy fut d'ailleurs la première à assurer la production de tels écrans.

La projection autostéréoscopique est bien entendu le principal axe de recherche en matière de restitution à ce jour. Un procédé à base d'écran lenticulaire et de projection à lumière dirigée a vu le jour, mais ce dernier est encore trop coûteux

et encombrant pour connaître un certain essor, bien que l'apport technologique soit remarquable.

Il faut aussi noter que l'on découvre au light field de multiples applications autre que l'image sur écran telle qu'on la connaît aujourd'hui. Le domaine de la réalité augmentée et de la réalité virtuelle démontre lui aussi un fort intérêt pour le concept en question, notamment à travers l'ajout d'éléments virtuels dans notre environnement via des lunettes types Google Glass; la société américaine Magic Leap a d'ailleurs récemment exposé sa technologie basée sur ces recherches.

II.2 - Applications du light field et marché actuel

II.2.a - Applications générales

II.2.a.1 - Mise au point

L'application la plus connue et désormais rendue célèbre par la marque Lytro est sans aucun doute la possibilité de refaire la mise au point *a posteriori* de la prise de vue. Cela est rendu possible par la capture d'informations à différentes profondeurs comme expliquée précédemment.

La première étape pour accéder à cette fonctionnalité est de calculer une carte de profondeur applicable à l'image enregistrée. Grâce à une interface logicielle, l'utilisateur peut alors choisir un endroit dans l'image qui est lié à un plan sur la carte de profondeur, et l'algorithme ajoutera du flou dans les parties de l'image ne correspondant pas à ce plan. Plus l'appareil dispose de pixels par microlentille, plus la précision de la carte de profondeur sera élevée et donc plus l'utilisateur pourra ajuster finement ses choix.

Diverses applications sont corollaires de la précédente. L'une d'entre elles est nommée "profondeur de champ étendue" et consiste à choisir la taille de la profondeur de champ dans l'image. Cela passe bien évidemment par la jonction de différents plans de netteté présents dans la carte de profondeur. Par conséquent, il est aussi possible d'extraire des images entièrement nettes; tout en gardant à l'esprit que de bonnes conditions de prise de vues sont au préalable nécessaires. En effet, la répartition des plans de netteté est faite autour du plan de mise au point déterminé par l'objectif principal, et connaît donc ses limites.

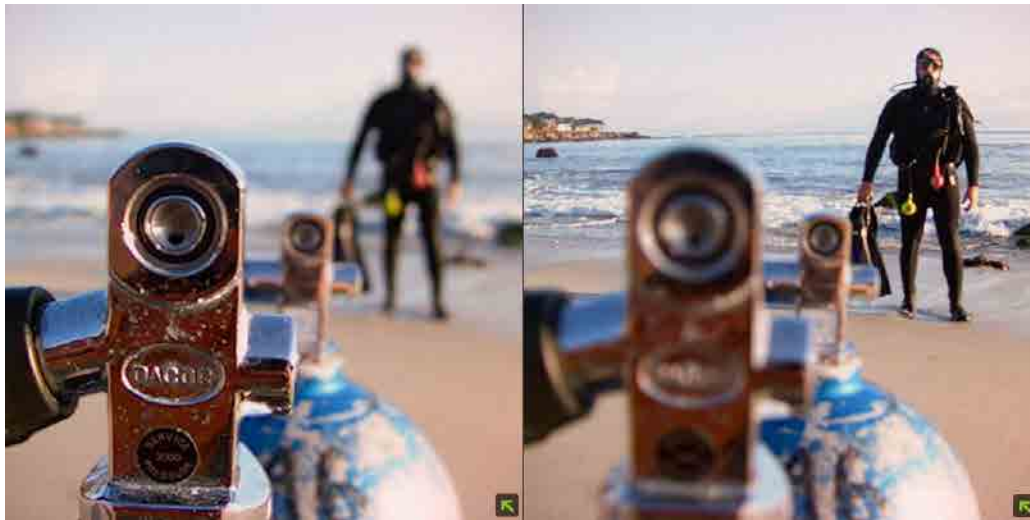


Figure 28 : Illustration d'un changement de mise au point avec un Lytro

II.2.a.2 - Prise de vue en relief

Une autre possibilité d'ailleurs mise en avant par Lytro est la prise de vue en relief. D'ordinaire, deux images voire deux dispositifs seraient nécessaires pour satisfaire la condition des deux points de vue. Mais une image de type *light field* contient assez d'informations pour y remédier.

Il existe deux manières de faire de la stéréoscopie avec un dispositif plénoptique. La première est très simple, car elle ne nécessite pas de calculs additionnels, simplement l'extraction de deux images selon une parallaxe intramicrolentille. Une telle démarche permet d'avoir des résultats corrects si le sujet est proche de l'objectif du dispositif, sinon la parallaxe sera trop faible. La seconde solution est possible après le calcul du *light field* par un ordinateur, simplement en synthétisant deux vues espacées d'une translation déterminée par l'utilisateur.

La dernière description implique une possibilité corollaire, elle aussi mise en avant par Lytro, qu'est le changement de perspective. Les différents points de vue sur le sujet permettent donc de tourner autour de celui dans une certaine mesure comme si on le faisait à l'observation (à la manière d'un panoramique courbe); à ne pas confondre avec un mouvement de translation de la caméra.

II.2.a.3 - Animation et vidéo

La principale application d'ordre commercial, elle aussi vantée par l'entreprise Lytro, est la possibilité d'animer les images prises avec des dispositifs plénoptiques. Son intérêt est essentiellement de l'ordre du divertissement ou de la communication, permettant ainsi d'assurer une sorte de transition entre l'image fixe et l'image animée.

La singularité de cette invention est sa composition, utilisant les différentes possibilités du *light field* explicitées plus tôt, telles que le changement de point de point de vue ou de mise au point, pour créer une sensation de mouvement. Ce type d'animation est bien évidemment particulièrement adapté à la démonstration technique des attributs de la technologie plénoptique¹.

La vidéo reste pour le moment quelque chose de marginal pour le grand public. En effet, les dispositifs de Raytrix s'adressant à une audience à dominante industrielle ne sont pas optimisés pour de la vidéo ou du cinéma. Cependant une potentielle application serait possible, aussi, car Lytro a récemment reçu d'importants fonds pour développer un centre de recherche sur ce sujet. Il faudrait toutefois que les divers problèmes liés à une application aux tournages explicités plus tôt soient résolus, et que l'utilisation de ces dispositifs soit simplifiée.

II.2.b - Applications scientifiques

II.2.b.1 - Vision par ordinateur

La vision par ordinateur est le domaine traitant de l'acquisition, du traitement, de l'analyse, et surtout de la compréhension des images. Nos yeux sont les périphériques que nous pouvons assimiler à des caméras en tant qu'ouvertures sur notre environnement. La vision par ordinateur essaie donc de simuler la relation entre nos yeux et le comportement du cerveau qui leur est lié. Ce sujet est la frontière des mathématiques, de l'informatique, et du traitement du signal, et a pour proches voisins la robotique, l'intelligence artificielle, et l'apprentissage machine.

¹ Un exemple particulièrement intéressant réalisé avec le Lytro Illum (et malheureusement pas démontrable ici) : <https://vimeo.com/113963468>

Le principal atout de la caméra plénoptique dans ce domaine est la stéréoscopie. En effet en vision par ordinateur beaucoup de protocoles débutent par la détermination d'une carte de profondeur, attribut déjà cité de ces dispositifs. De plus, au-delà de la définition de l'image en deux dimensions, la définition angulaire ajoute à leur intérêt.

Concrètement, les applications sont multiples et n'ont pour limite que la puissance de calcul des ordinateurs et l'imagination des concepteurs de logiciels. La reconnaissance faciale est un sujet qui suscite beaucoup d'intérêt au sein de la communauté scientifique, tout comme la classification d'objets. Des mesures métriques et volumiques sont aussi possibles si l'on associe une calibration pertinente à la caméra.

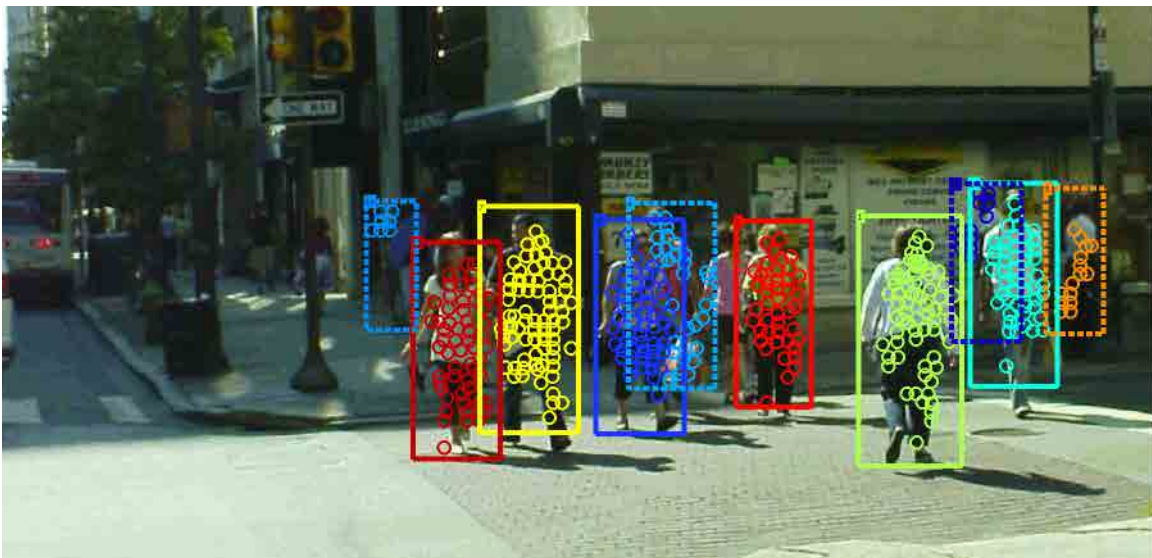


Figure 29 : Les voitures à conduite automatisée comme la Google Car sont équipées de système de vision permettant la détection et la classification d'obstacles

II.2.b.2 - Microscopie

La microscopie est une des principales applications scientifiques des dispositifs plénoptiques étant donné l'intérêt du milieu médical. De plus, un objectif de microscope affichant un grandissement très élevé, les objets observés sont donc extrêmement petits par rapport à l'ouverture, cela permettant d'exploiter la non-occlusion explicitée plus tôt dans ce mémoire. Ainsi, une visualisation microscopique et plénoptique permet d'observer un échantillon en tranches à différentes profondeurs.

L'idée est venue en cherchant à corriger trois défauts inhérents aux microscopes :

-la diffraction limite leur résolution; en effet, à un grandissement élevé, on ne peut distinguer un objet dont la taille serait inférieure à la moitié de la longueur d'onde de la lumière utilisée comme éclairage¹.

-un objectif de microscope est télécentrique, ce qui implique qu'un déplacement latéral du spécimen observé n'offre pas de nouvelles perspectives, et donc ne permettrait pas de différencier deux éléments qui seraient superposés.

-la profondeur de champ d'un tel système optique est extrêmement faible, ce qui implique l'observation d'un sujet épais en plusieurs temps; une opération rendue difficile si celui-ci est vivant ou encore sensible à la lumière.

Le premier défaut cité ci-dessus est propre à la nature de la lumière et sa correction n'est pas encore complètement élucidée (même si une solution possible dans ce cadre impliquerait l'utilisation d'une lumière cohérente), cependant les suivants peuvent être simplement corrigés par un dispositif de capture plénoptique. Les microlentilles offrant différents points de vue à la manière de différentes caméras, il devient alors possible d'observer un spécimen avec une parallaxe. De plus, un tel dispositif enregistre des informations sur une profondeur de champ étendue, résolvant ainsi le dernier problème.

Une telle avancée rend alors possible l'observation d'un spécimen après sa capture par le dispositif, voire sa transmission à quelqu'un d'autre sans risquer de l'altérer. Il faut aussi mettre en avant, en plus des attributs habituels du plénoptique, qu'il n'est plus nécessaire de faire une mise au point parfaite lors de la première observation, opération périlleuse à fort grandissement.

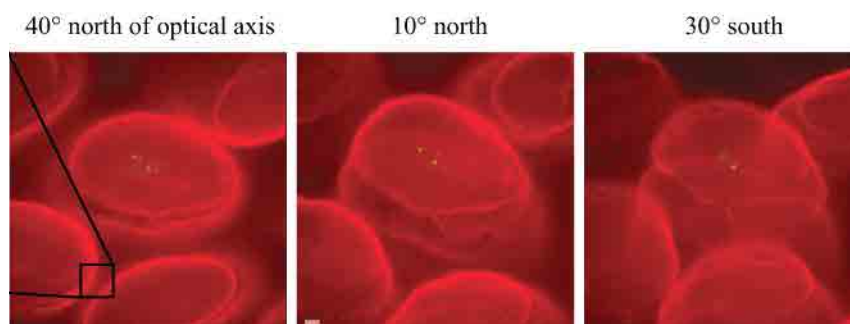


Figure 30 : Observation de cellules sanguines selon différentes perspectives avec un dispositif plénoptique

1 LEVOY M., et al. "Light Field Microscopy". ACM Transactions on Graphics (TOG), 2006, Vol. 25, n.3.

II.2.b.3 - Auscultation, surveillance, et qualité

En matière d'application industrielle, l'inspection et le maintien d'une certaine qualité prédéfinie sur l'ensemble d'une chaîne de production sont essentiels. Les systèmes d'imagerie sont déjà présents dans ces environnements, et pour différentes raisons, mais les dispositifs plénoptiques ont là aussi leurs qualités à apporter.

La vision à distance désigne l'utilisation d'instruments de visualisation pour accéder à des zones que l'on ne peut observer directement. On peut aussi bien trouver ces situations dans l'industrie que dans le médical. La miniaturisation des capteurs pourrait d'ailleurs mener à la réalisation d'appareils à endoscopie plénoptiques, où les caractéristiques d'un tel dispositif (profondeur et changement de perspective notamment) seraient d'autant plus d'outils de diagnostic pour les praticiens.

L'inspection désigne l'auscultation de petites parties ou pièces, elles aussi difficile d'accès, car trop petites pour être observées à l'œil nu, mais sans être au niveau de la microscopie. On peut citer comme exemple l'auscultation de la qualité de prises ou de câbles, où la modélisation en trois dimensions présente un intérêt certain.

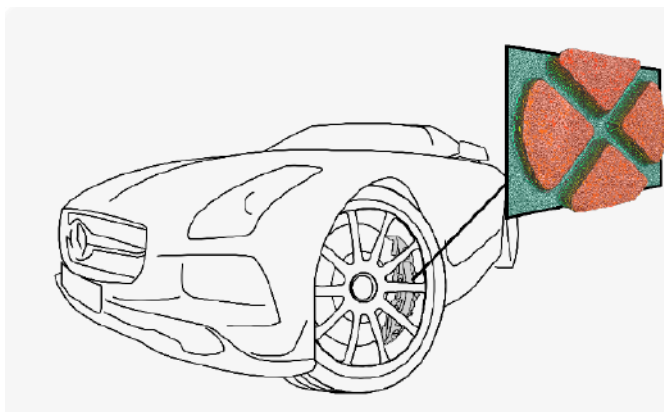


Figure 31 : Inspection de petits éléments mécaniques que l'on ne pourrait faire à l'œil nu

En matière de surveillance, les dispositifs plénoptiques pourraient bien évidemment apporter leur perception en profondeur de l'environnement observé, mais aussi toutes les possibilités que cela implique : estimation de distances, de volume, reconnaissance faciale, etc.

II.2.c - Acteurs du marché

II.2.c.1 - Lytro Incorporation

Il excite à l'heure actuelle deux principaux développeurs de dispositifs plénoptiques. Lytro est implanté en Californie et s'adresse au grand public. Cette entreprise a été créée en 2006 par Ren Ng, alors diplômé de l'Université de Stanford où il travaillait au développement d'appareils plénoptiques avec Marc Levoy. C'est en 2011 que le premier appareil est alors mis en vente, celui-ci permettait de réaliser des photographies dont on pouvait refaire la mise au point, mais avec une définition limitée par la présence de microlentilles.

Cependant, ce premier essai a permis à l'entreprise d'attirer bon nombre d'investisseurs et ainsi de développer un nouveau produit. Le Lytro Illum, annoncé et commercialisé en 2014, cherche ainsi à toucher aussi bien les amateurs passionnés que les professionnels. L'appareil monobloc dispose d'un objectif 30-250mm et d'un capteur de 40 mégapixels, bien que les photos une fois traitées (en deux dimensions) n'en fassent que quatre.



Figure 32 : Le Lytro Illum tel que présenté par ses créateurs

Plus récemment, Lytro s'est vu recevoir de multiples investissements, notamment de la part du gouvernement américain afin d'appliquer sa technologie à la défense. De plus, un investisseur privé a aussi participé afin de permettre à l'entreprise de se développer vers les nouvelles technologies liées à la réalité virtuelle et augmentée; Lytro a déjà annoncé la commercialisation d'un kit de développement *light field* pour la recherche.

II.2.c.2 - Raytrix GmbH

Raytrix a été fondée en 2008 à Kiel, au nord de l'Allemagne, par un universitaire et un entrepreneur locaux. Leur première commercialisation d'une caméra vidéo plénoptique date de 2010, soit avant Lytro. Leurs produits s'adressent à un public averti et professionnel, avec de nombreuses applications industrielles.

Cette entreprise compte aujourd'hui une vingtaine de personnes et commercialise une large gamme de caméras. Ses dispositifs sont généralement assez compacts et se manipulent à l'aide d'un périphérique externe, le plus souvent un ordinateur avec une importante puissance graphique. Leurs caractéristiques sont de plus adaptables à la demande des clients, ainsi on trouve des caméras monochromes, infrarouges, à large dynamique...

Raytrix compte parmi ses clients de prestigieuses universités, telles que le Massachusetts Institute of Technology ou encore Berkeley, mais aussi des acteurs industriels renommés, comme nVidia, Zeiss, ou Arri. Il faut aussi noter que Raytrix fait partie des récipiendaires d'un investissement européen pour l'innovation technologique.

Le principal apport technologique de cette entreprise fut tout d'abord l'utilisation à grandes échelles des principes de Todor Georgiev cités plus tôt, mais aussi la création d'une méthode novatrice de gestion de la redondance d'information afin d'obtenir des images plus résolues en sortie.



Figure 33 : La R42, principal modèle de Raytrix à l'heure actuelle

II.2.c.3 - Expérimentations et marchés potentiels

Le *light field* faisant l'objet d'un certain engouement dans la recherche, il est naturel que d'autres acteurs du marché des nouvelles technologies s'y essayent, avec différents buts.

La société Pelican Imaging, basée dans la Silicon Valley en Californie, non loin de Lytro, commercialise un module plénoptique pour smartphone. Sa particularité est que ce dernier comporte de multiples lentilles principales, à la manière de différents objectifs, et non un réseau de microlentilles comme il est généralement le cas. Sa technologie repose sur le calcul d'une carte de profondeur couplé à une image nette de part et d'autre du champ, laissant ainsi la possibilité à l'utilisateur de choisir sa mise au point en ajoutant un flou artificiel sur les zones non désirées. Nokia a d'ores et déjà acheté des produits de cette entreprise pour les insérer dans un de ses téléphones.

nVidia, leader du marché des cartes graphiques, a aussi contribué à ce développement. L'entreprise a fait la démonstration en 2013 d'un dispositif de réalité virtuelle qu'un utilisateur pourrait porter à la manière de lunettes. Ce dernier comportait deux écrans lenticulaires disposés très près de l'oeil; la vue de l'utilisateur est ainsi censée être dirigée vers l'infini, où les yeux visent parallèlement, ne nécessitant pas d'accommodation. Ce dispositif ambitieux ne fut pas commercialisé, malgré son association audacieuse de la technologie du *light field* et de la montée des casques à réalité virtuelle.

La société Magic Leap, localisée en Floride, utilise elle aussi le *light field* d'une manière originale. Cette entreprise agit dans l'ombre et ne communique que très peu sur ses activités; cette dernière travaille à l'intégration d'éléments virtuels dans notre environnement, à la manière de la réalité augmentée. Son objectif est d'associer le monde qui nous entoure à des données issues de *light field*, disposant ainsi de toutes les informations nécessaires à leur intégration réaliste. Son dispositif serait donc semblable à des Google Glass avec un écran bien plus qualitatif.

II.3 - Flou photographique et plénoptique

II.3.a - Nature du flou

II.3.a.1 - Flou d'objectif

Un objectif d'appareil photo définit une profondeur de champ, c'est-à-dire un intervalle de distances sur lequel la taille de la tâche floue est inférieure à celle du cercle de confusion. Cette définition implique d'une part que seuls les éléments disposés dans cet intervalle seront nets sur l'image, mais aussi que le diamètre de la tâche floue varie avec la distance à l'objectif. Cette dernière caractéristique décrit une situation que l'on connaît au moins visuellement : plus un objet est éloigné de la profondeur de champ, plus il sera flou.

Le terme populaire *bokeh* décrit la qualité visuelle subjective de ce flou, parfois abusivement défini comme étant celle du flou d'arrière-plan, bien qu'il y ait des éléments flous en amont de la profondeur de champ soit en réalité envisageable. Ainsi, un point hors de la profondeur de champ prend la forme de la tâche floue, qui est elle l'image de l'ouverture de l'objectif, et donc de son diaphragme. La forme de ce flou est donc celle du diaphragme, qui tend à être rond sur les objectifs contemporains, mais peut aussi être hexagonal ou triangulaire. En toute logique, plus la distance à la profondeur de champ sera importante, plus la taille de la tâche floue augmentera elle aussi.

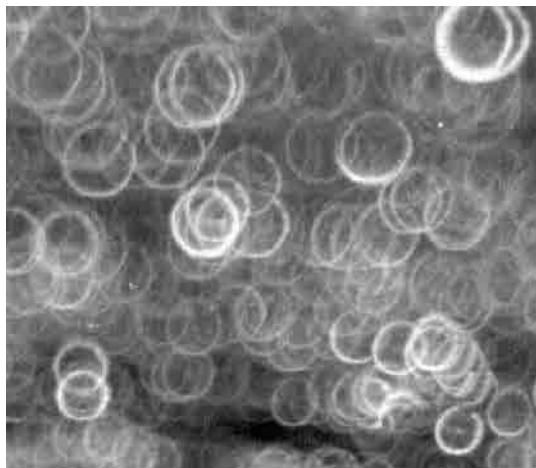


Figure 34 : Tache floue annulaire caractéristique d'un objectif catadioptrique

II.3.a.2 - Flou de discontinuité axiale

Il existe un second type de flou qu'il est intéressant de décrire ici, car potentiellement simulable à partir d'images plénoptiques. Le flou de discontinuité axiale est originellement réalisé avec une chambre photographique, car il nécessite d'orienter les plans de l'objectif et du capteur (aussi appelé plan du film) indépendamment.

En temps normal, l'objectif et le capteur sont placés sur deux plans parallèles afin de faciliter la mise au point. Cependant, il peut arriver, en photographie d'architecture notamment, que l'on ait besoin d'orienter le plan de mise au point différemment. Cependant, si l'on oriente l'objectif d'une autre façon, un changement de mise au point donnerait alors un mouvement rotatif à la profondeur de champ plutôt que de la déplacer sur l'axe optique. Pour y remédier, il est nécessaire d'adapter l'orientation des plans image, capteur, et objectif pour que les trois se recoupent en un même point; cette règle est nommée principe de Scheimpflug, d'après le nom de son auteur. À noter aussi qu'il est possible de ne pas respecter ce principe pour un parti-pris esthétique et ainsi de réaliser des profondeurs de champ qui seraient orientées différemment.

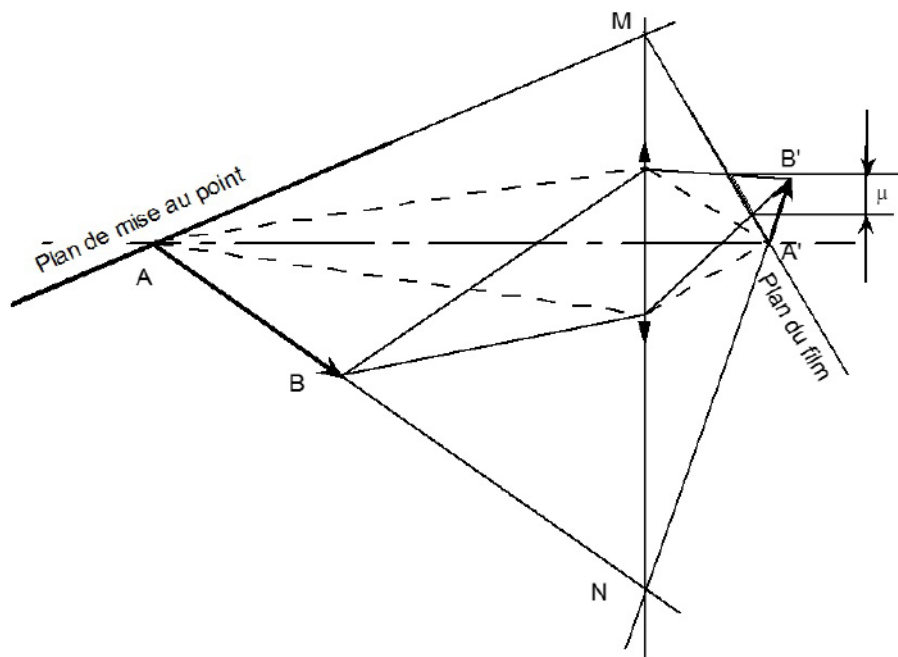


Figure 35 : Schéma récapitulatif du principe de Scheimpflug. Les trois plans se recoupent en N, assurant ainsi la mise au point désirée.

II.3.b - Le problème du plénoptique

II.3.b.1 - Nature de l'image capturée

Comme explicitée un peu plus tôt dans ce mémoire, une image plénoptique n'est pas structurée comme une image photographique habituelle. En termes géométriques, un dispositif de prise de vue standard réalise des transformations depuis un espace en trois dimensions (le sujet, l'environnement) vers un autre espace en deux dimensions (l'image aplatie). Un dispositif plénoptique contient de multiples vues de cette transformation, disposant aussi d'une résolution dite angulaire. Cette particularité permet d'extraire des informations sur la profondeur et ainsi de reconstruire un modèle 3D du sujet.

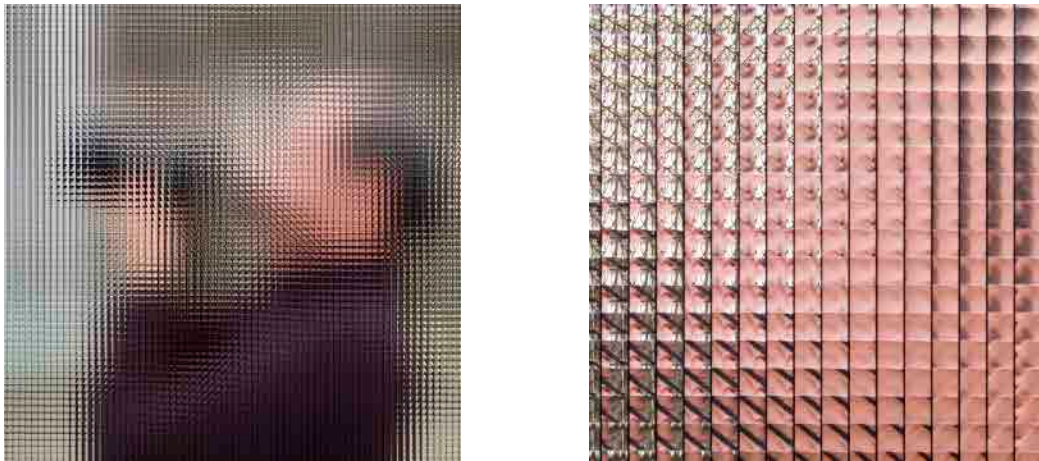


Figure 36 : Une image plénoptique non traitée et un de ses détails

Chaque microlentille recouvre un certain nombre de pixels, ces derniers portant l'information caractéristique du dispositif : la division des rayons qui en temps normal s'agglutinaient dans le même puits. On obtient ainsi une image qui ne peut être visualisée ainsi et nécessite un traitement avant de retrouver un véritable aplat.

Ainsi, une image plénoptique contient en réalité plusieurs images dont la mise au point est faite à différentes profondeurs, selon les principes expliqués plus tôt dans ce mémoire. La sélection des informations n'est donc pas une démarche aisée, de plus car cette opération passe par l'utilisation de la carte de profondeur, dont on attend une précision maximale.

II.3.b.2 - Reconstruction du flou et mise au point

La principale méthode utilisée pour un dispositif plénoptique standard est la sélection d'un pixel par microlentille, ce pixel devant être le même dans chaque structure. On obtient ainsi une vue nette pour une certaine distance au sujet. Il est possible de déplacer latéralement l'observation en choisissant un pixel différent sur l'axe latéral des microlentilles. Une méthode présentée par Stanford consiste à moyenner différents pixels afin de simuler des perspectives de prise de vue différente.

Une autre méthode consiste à réaliser l'image avec la profondeur de champ la plus élevée possible en moyennant tous les pixels présents sous chaque microlentille et de l'utiliser conjointement avec la carte de profondeur. Ainsi, une fois que l'utilisateur ait choisi le plan qu'il souhaite conserver nets, le logiciel applique un algorithme de flou sur les parties non sélectionnées grâce à l'information contenue dans la carte de profondeur. Ce procédé ne donnant pas de très bons résultats d'un point de vue esthétique, plus particulièrement lorsque la profondeur de champ voulue est restreinte.

II.3.b.3 - Possibilités d'amélioration

Une des améliorations possibles concernant la seconde méthode consiste à utiliser la carte de profondeur pour déterminer la quantité de flou à appliquer. En effet, pour un dispositif standard, la taille de la tâche floue augmente avec la distance à la profondeur champ déterminée par l'objectif, donnant ainsi un flou d'objectif graduel et naturel. Moduler la quantité de flou en fonction de la distance au plan choisi est rendu possible avec la carte de profondeur et donnerait des résultats bien meilleurs visuellement.

Une seconde possibilité consiste à réaliser le calcul de l'environnement en trois dimensions auparavant, et ainsi de ne sommer que les images dans lesquels un objet que l'on choisit pour être net serait visible. Mais cette opération sera explicitée en détail plus tard dans ce mémoire.

II.3.c - Flous algorithmiques

II.3.c.1 - Transformée de Fourier et filtrage

La transformée de Fourier est de loin la technique la plus répandue en traitement du signal. Cette opération effectue une décomposition d'un signal en une fonction de ses fréquences. Un signal est généralement défini comme étant une fonction du temps, la particularité de l'image est que ses fréquences ne sont pas dépendantes du temps, mais de la position spatiale de l'échantillon (autrement dit, la position du pixel étudié).

Joseph Fourier, mathématicien à l'origine de cette technique, définit deux équations :

$$\hat{f}(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i x \xi} dx, \quad f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(\xi) e^{2\pi i \xi x} d\xi,$$

La première décrit la transformée de Fourier où x représente le temps (la position du pixel dans l'image) et ξ la fréquence (la valeur associée au pixel).

La seconde expose la transformée inverse, permettant de récupérer le signal d'origine sans altérer l'information qu'il comporte.

Cette technique permet la réalisation de filtrages directement dans le domaine fréquentiel, et donc de simplifier par exemple l'application de filtre passe-haut ou passe-bas.

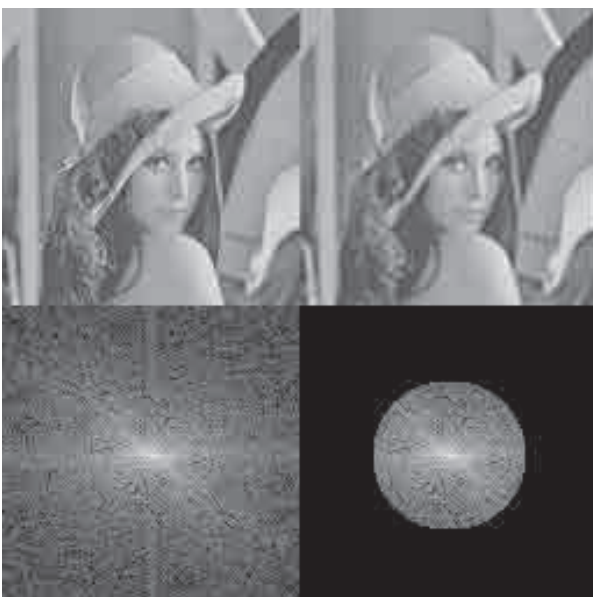


Figure 37 : L'image originale (en haut à gauche), et sa transformée de Fourier en dessous. Les basses fréquences (les aplats) sont rassemblées au centre de la représentation. Un filtre passe-bas revient donc à enlever les hautes fréquences situées en périphérie; l'image en haut à droite représente la transformée inverse des données fréquentielles une fois filtrées (qui sont elles en bas à gauche).

II.3.c.2 - Convolution et boîte

En traitement d'image, les algorithmes de flou sont basés sur la méthode du produit de convolution. Issue des mathématiques et du traitement du signal, cette technique est de loin une des plus utilisées pour le filtrage avec la transformée de Fourier.

Une vulgarisation du produit de convolution consisterait à le décrire comme une translation d'une fonction par une autre. Schématiquement, le produit de convolution d'une fonction par une autre s'apparente à faire glisser l'une sur l'autre pour toutes les valeurs de leur ensemble de définition et d'en extraire pour résultat l'intégrale (autrement dit, l'aire) partagée par les deux courbes. Cette opération est en elle-même un filtrage à part entière; pour s'en convaincre, il suffit de voir cette opération comme une moyenne glissante, et par conséquent d'imaginer cela comme une moyenne simplifiée, qui ne serait autre qu'un filtre passe-bas en vocabulaire de traitement du signal. Il faut noter aussi qu'une des importantes propriétés de cette opération est la réversibilité, son opération inverse est d'ailleurs appelée déconvolution, permettant ainsi de traiter un signal sans l'altérer.

Cette description pouvant tout de même paraître obscure, une application à l'image permet de saisir la méthode efficacement. Une image est ici pensée comme une grille (matrice, au sens mathématique) de valeurs, et la fonction de convolution est appelée noyau. Ce dernier est aussi une grille, mais de taille plus faible que l'image à traiter. Le rôle du noyau est de modifier les valeurs de l'image d'entrée en exerçant une moyenne pondérée en son centre de cette manière :

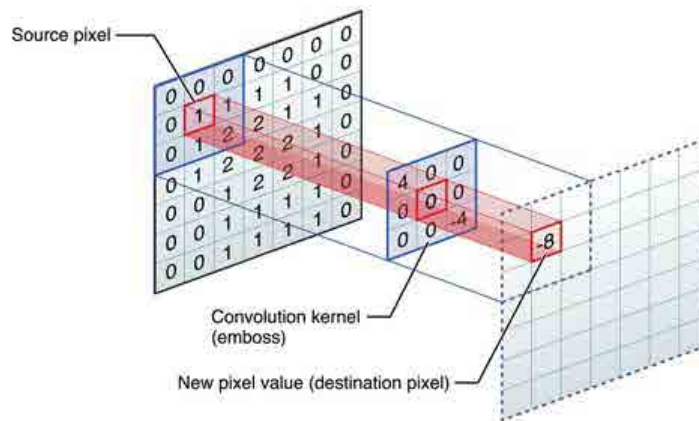


Figure 38 : Application de la convolution à l'image. Le noyau est ici de taille 3x3; en le plaçant sur l'image que l'on souhaite traiter, celui-ci retourne en sortie une valeur à placer en la position de son pixel central telle que celle-ci soit égale à la somme des pixels recouverts par le noyau et pondérés par les coefficients que celui-ci contient.

Le filtrage le plus simple que l'on puisse imaginer avec cette méthode est celui appelé flou de boîte, ou encore flou encadré (de l'anglais *box blur*). Il consiste à réaliser l'opération avec un noyau généralement de taille 3x3, le minimum possible, et en ayant tous ses composants égaux à 1 (ou 1/9 si l'on considère que la radiométrie de l'image doit être constante). Ce filtre réalise donc une moyenne on ne peut plus simple de l'image de base, et y ajoute ainsi du flou.

II.3.c.3 - Flou gaussien

Dérivé du flou encadré, le flou gaussien est certainement l'algorithme de flou le plus utilisé à l'heure actuelle, et ce aussi bien dans des logiciels comme Photoshop que par des applications de partage de photographies comme Instagram.

Sa mise en oeuvre se fait par produit de convolution à partir d'un noyau contenant les valeurs d'une fonction gaussienne, couramment utilisée pour représenter des distributions en statistique. Sa courbe est caractérisée par sa forme en cloche :

L'utilisateur peut ainsi faire varier trois éléments :

- l'espérance, qui va déterminer la valeur maximale de la fonction et donc l'importance accordée au point central du noyau.
- l'écart-type, qui détermine où la fonction est centrée.
- la taille du noyau, qui est proportionnelle au taux de flou que l'algorithme génère.

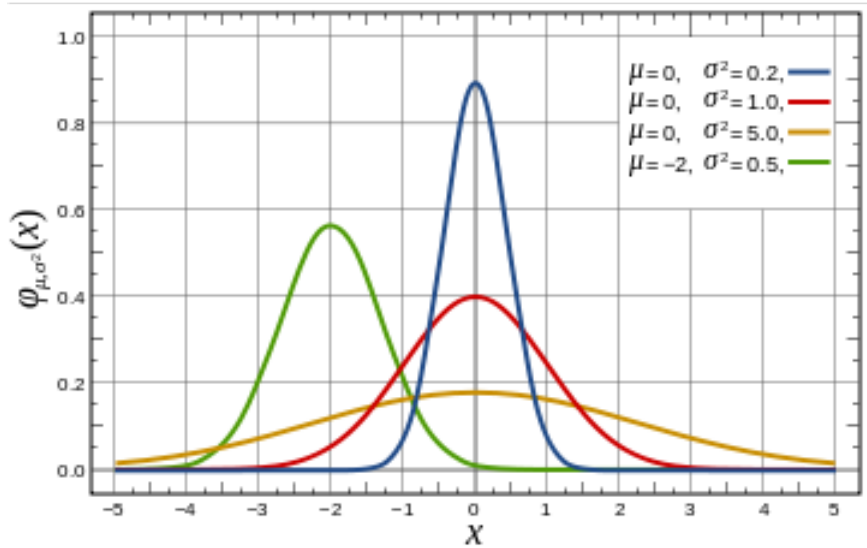


Figure 39 : Fonctions gaussiennes avec différents écarts-types et variances

On obtient ainsi des matrices comme celles-ci :

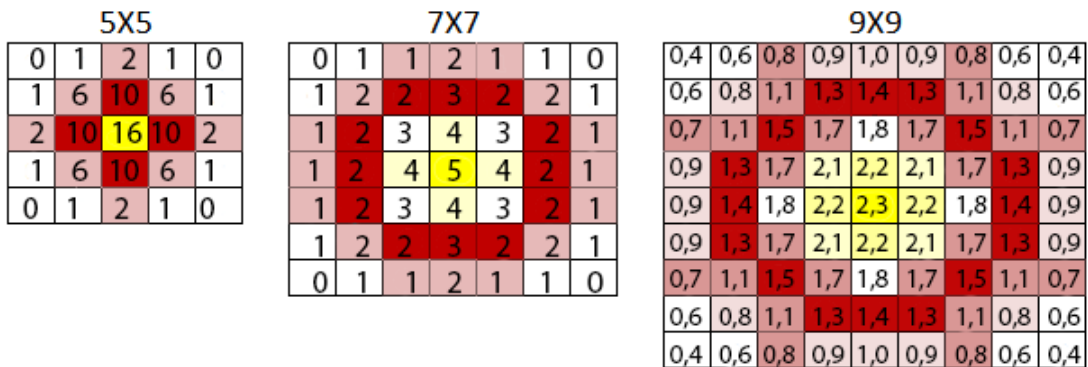


Figure 40 : Des noyaux pour appliquer un flou gaussien de différentes tailles, résultant en des flous de différentes importances. Plus l'on choisit d'étaler le noyau sur un nombre important de pixels, plus l'image traitée aura perdu en netteté (ces matrices sont imprécises à titre d'exemple, afin d'exposer plus clairement la nature de la répartition gaussienne).

Il est cependant à noter que la plupart des logiciels, dont Photoshop, ne demandent à l'utilisateur de choisir que la taille du noyau, utilisant ainsi une fonction gaussienne d'écart-type 0 et d'espérance 0.5 ou 1. Il faut aussi voir que répéter un flou encadré trois fois approche un flou gaussien de même taille de noyau à plus de 90%, et dans un taux même supérieur pour plus de répétitions.

II.3.c.4 - Des algorithmes plus complexes

Il existe bien évidemment beaucoup d'autres algorithmes plus recherchés afin de produire du flou dans une image. Il serait difficile de tous les étudier et ce n'est par ailleurs pas le sujet de ce mémoire, cependant deux d'entre eux présentent un intérêt qu'il est pertinent de citer ici.

Le premier est le dénommé *stack blur*, créé par Mario Klingemann, un informaticien allemand. Son algorithme est décrit comme étant un compromis entre le flou encadré et le flou gaussien, mais résultant en une bien meilleure esthétique que le premier et en étant sept fois plus rapide que le second. Il est appelé *stack blur* (flou en pile) à cause de son fonctionnement; l'algorithme créant une sorte de pile de couleurs mouvante. De ce fait, au fur et à mesure de sa progression, il suffit d'ajouter une nouvelle couleur à la droite de la pile et d'extraire le dernier élément (le plus à gauche). Ce système de traitement permet à l'algorithme d'être beaucoup plus rapide qu'un flou gaussien tout en s'approchant de son esthétique.



Figure 41 : Comparatif visuel : (de gauche à droite) l'image originale, celle avec flou gaussien, et enfin celle avec le stack blur. On constate aisément que les deux derniers sont très similaires au niveau du rendu.

Un autre algorithme intéressant est fourni par la collection de filtres d'Adobe Photoshop et est nommé flou d'objectif.

Le principal intérêt de cet algorithme est qu'il est possible d'y ajouter une carte de profondeur. Celui-ci agit de la même manière qu'un flou encadré en faisant une moyenne selon un motif, qui peut aussi bien être un carré, un triangle, ou encore un cercle; ce motif correspondant à la forme du diaphragme que l'on souhaite simuler. Avec l'ajout d'une carte de profondeur, la taille du noyau contenant le motif varie avec la distance à l'objet, de la même manière là aussi qu'un objectif. Il est aussi possible d'ajouter des reflets spéculaires à l'image à partir d'un système de seuillage, ainsi que de préférer une distribution gaussienne à une répartition uniforme de la moyenne, mais en optant pour un temps de calcul plus long.

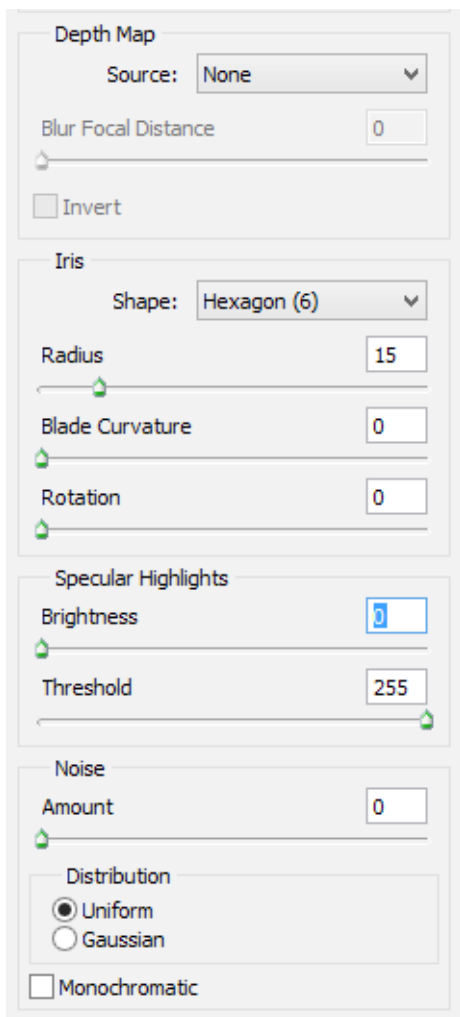


Figure 42 : Capture d'écran des paramètres de la fonction flou d'objectif de Photoshop

III - Expérimentations et tentatives de reconstruction

III.1 - Raytrix

III.1.a - Présentation

III.1.a.1 - Dispositif

À la suite du stage que j'ai effectué au sein de l'entreprise Raytrix GmbH et des liens que j'ai su entretenir avec eux depuis, leur équipe m'a gracieusement prêté une caméra qu'ils fabriquent. Cette partie du mémoire a été supervisée par Mathieu Brédif.

Je dispose donc pour la réalisation de ce mémoire d'une caméra Raytrix R8 à la taille extrêmement réduite étant donné qu'elle se commande à partir d'un ordinateur. Ce dispositif est doté d'un capteur de huit millions de pixels surmonté bien évidemment d'un réseau de microlentilles. Les images en sortie sont de 3840 par 2160 pixels afin d'assurer une continuité dans l'utilisation de séquences, car leur résolution n'est pas la même pour chaque sujet. En effet, les calculs de Raytrix se basent sur l'étude de la redondance d'information et parviennent ainsi à extraire des images dont la définition est supérieure à celles issues des dispositifs de Lytro par exemple. La résolution effective de ces dernières est donc changeante en fonction du nombre de microlentilles dans lequel on perçoit le sujet; plus la redondance sera forte, plus la résolution en sortie sera faible. À noter aussi que comme exposé précédemment, les caméras de Raytrix disposent de trois types de microlentilles différentes disposées en quinconce afin de recueillir le maximum d'informations sur la profondeur.

Cette caméra est équipée d'une monture d'objectif type C, monture courante sur les microscopes, les petites caméras de surveillance, mais aussi sur les dispositifs d'imagerie scientifique. Cette dernière est on ne peut plus rudimentaire étant donné qu'elle est simplement constituée d'un pas de vis. N'ayant pu trouver des optiques à monture C d'une qualité suffisante pour mes recherches, je me suis par conséquent procuré un adaptateur C vers Nikon F afin d'utiliser les objectifs disponibles à l'école.

Il est important de préciser que cette caméra, ainsi que le logiciel RxLive dont la présentation est faite dans la partie suivante, nécessite un dongle USB de sécurité afin d'accéder à leurs fonctionnalités les plus poussées. À noter aussi que Raytrix recommande l'utilisation d'un SSD¹ pour les traitements afin d'optimiser les temps de calcul. Il est de plus indispensable d'utiliser une carte graphique nVidia supportant le CUDA,² car, suite à un partenariat, certains calculs d'image passent nécessairement par cette plateforme.

III.1.a.2 - Logiciel

Je dispose aussi de deux logiciels fournis par Raytrix pour le contrôle de leurs caméras. Le premier se nomme Ray Cam View et dispose de fonctionnalités assez rudimentaires. Celui-ci sert essentiellement à vérifier le bon fonctionnement du dispositif avant de passer sur le logiciel complet.

Le second programme est RxLive et nécessite le dongle de sécurité pour fonctionner au-delà du mode de démonstration. Ce logiciel contient toutes les fonctionnalités nécessaires à la capture et au traitement des images plénoptiques. Outre les fonctionnalités d'enregistrement en vidéo et image fixe, il dispose d'un guide complet de calibration de la caméra, indispensable à sa bonne utilisation; il est important de noter qu'ici une calibration de caméra définit un ensemble boîtier/objectif à focale fixée (il en est par conséquent de même pour la distance de mise au point, cette dernière changeant légèrement la focale). Il est possible de visualiser les images en faisant la mise au point sur un plan choisi (*refocus*), sur la totalité du champ (*total focus*), ou encore d'étudier l'image telle que capturée par le capteur (*raw*), mais aussi la carte de profondeur en deux ou trois dimensions (*depth* et *depth 3D*). Concernant les réglages, le logiciel permet tous les contrôles classiques de traitement (courbe, netteté, couleurs, débruitage, recadrage), un système précis

1 SSD, acronyme de l'anglais Solid State Drive, désigne la nouvelle génération de disques durs ne contenant, paradoxalement, pas de disque, mais une mémoire flash similaire à celle présente dans les cartes mémoires ou les smartphones. Leur temps d'accès et d'écriture sont bien meilleurs que ceux de leurs égaux à disque physique.

2 La technologie CUDA est une architecture de programmation développée par nVidia et optimisée pour le calcul sur carte graphique. Son utilisation vise à optimiser tout rendu impliquant de l'image en utilisant la carte graphique de l'ordinateur et non le processeur central, dont l'architecture est moins adaptée à cela.

de réglage de la mise au point à posteriori, ainsi que la possibilité d'influer sur le calcul de la profondeur et sur la représentation de la carte de profondeur. Dernier point, le logiciel permet d'exporter les images à chaque étape du traitement et offre aussi l'export de séquences d'images dans différents formats.

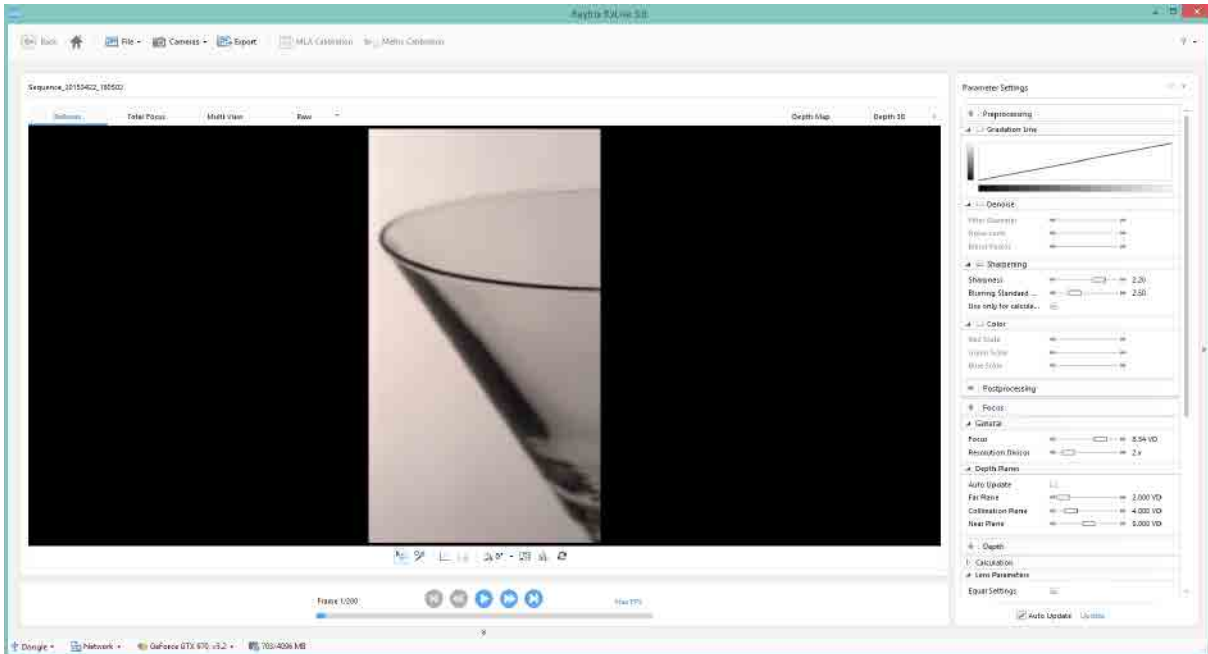


Figure 43 : Capture d'écran de l'interface du logiciel RxLive

Je dispose aussi du SDK¹ de Raytrix pour ce mémoire. Ce dernier permet l'utilisation de fonctions recouvrant l'enregistrement des images, leur lecture, leur enregistrement, ainsi que tous les traitements habituellement possibles (refocus, calcul de profondeur, etc.) Ce produit nécessite l'utilisation du dongle pour fonctionner.

III.1.a.3 - Données

Les images produites par la caméra de Raytrix sont contenues dans un format propriétaire nommé *RayFile*. L'utilisation de ce type de fichier est essentielle pour exploiter au maximum leur caméra, car seul ce conteneur détient toutes les informations nécessaires. Un tel élément compte donc :

- L'image brute en niveau de gris telle qu'elle est enregistrée par le capteur.
- L'image blanche réalisée pour les besoins de calibration et de correction du vignettage.

¹ Un SDK, de l'anglais Software Development Kit, est un ensemble d'outils permettant la création d'applications liées à une certaine plateforme (ici, les caméras de Raytrix).

-Les informations sur la calibration de la caméra (nombre, taille, et focale des microlentilles, principalement).

Il est aussi possible d'enregistrer des séquences d'images dans un même RayFile afin de ne pas répéter les informations invariantes (image blanche et calibration).

Le flux de travail avec les images de Raytrix est le même que ce soit avec le logiciel RxLive ou avec le SDK, et est le suivant :

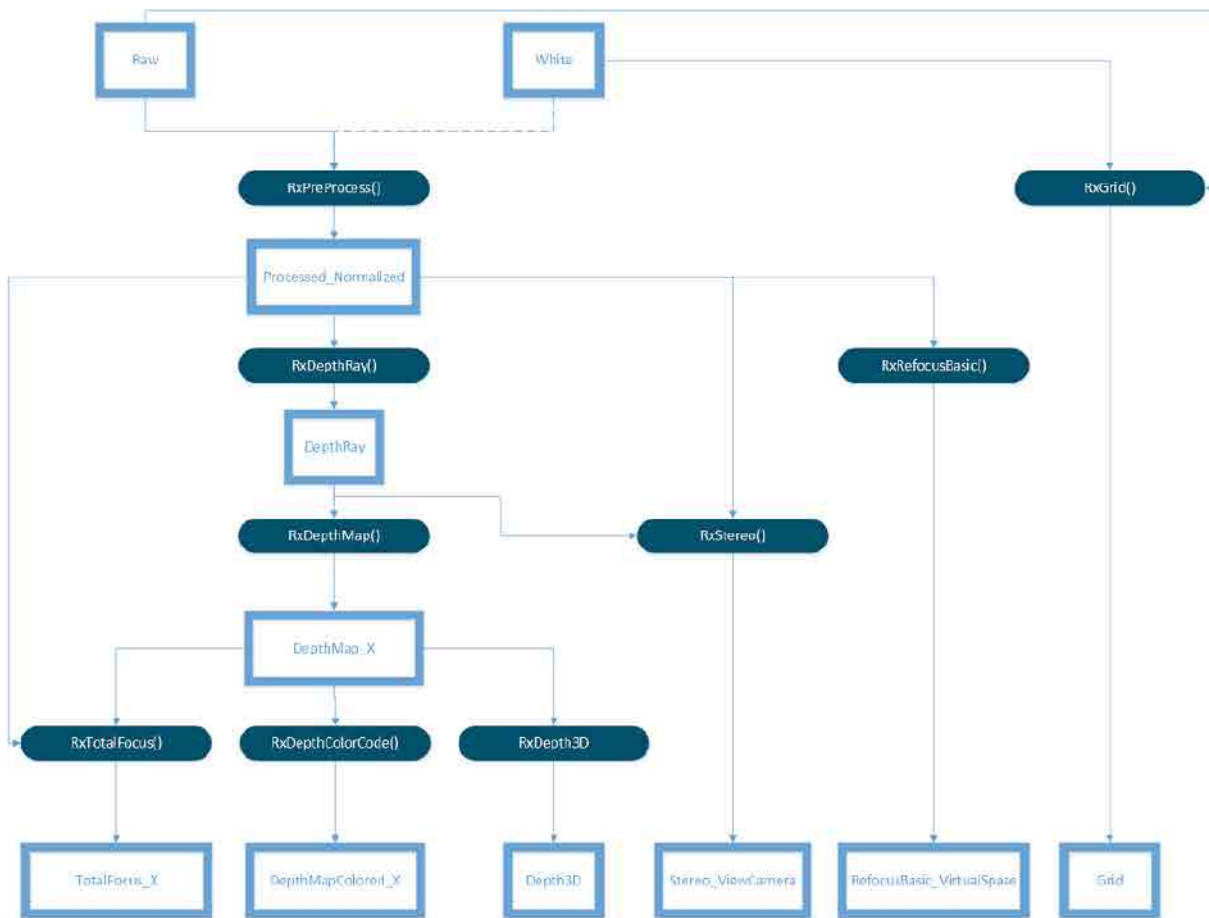


Figure 44 : Schéma du flux de travail relatif au traitement des images de Raytrix

Le traitement d'une image de type *RayFile* commence donc toujours avec la lecture de l'image brute et de l'image blanche évoquées plus tôt. À partir de là, il est possible d'exporter l'image appelée *Grid* qui est en fait l'image brute sur laquelle on a disposé l'architecture (position, type) des microlentilles. En faisant l'étape *RxPreProcess()* on obtient alors une image nommée *Normalized*, qui est débayerisée et corrigée des défauts reconnus à la calibration, mais qui comporte encore les microlentilles. On peut ensuite aussi bien réaliser des images refocalisées, ou alors commencer un calcul de profondeur et en extraire une carte du même nom.

III.1.b - Mise en pratique

III.1.b.1 - Démarche et utilisation du SDK

Notre but ici va être de reconstruire le flou d'objectif de l'image en influant sur la forme de l'ouverture. Le résultat sera en quelque sorte équivalent à une modification du bokeh (précédemment évoqué) telle que si elle était faite à la prise de vue et non par un filtrage. La programmation de cette partie est effectuée en C++ sous le logiciel Visual Studio.

Le code débute sur la base d'un exemple fourni dans la documentation du SDK de Raytrix décrivant l'initialisation nécessaire avant un traitement plus avancé des images. Il est composé des fonctions suivantes :

- RxInit, qui initialise l'utilisation de la bibliothèque de fonction Raytrix;
- RxCudaSelectDevice, qui sélectionne automatiquement la carte graphique nVidia compatible avec CUDA pour y faire ses calculs.
- RxRayBind, qui lie le fichier image à traiter à un indice qui lui sert au traitement par la carte graphique.
- RxPreprocess, qui est la première fonction à préparer l'image pour la suite; on travaille à partir de cette étape sur une image dite *Normalized* comme expliqué précédemment.

La première solution ici consiste à extraire l'image blanche de calibration, de la modifier à notre convenance, puis de la remplacer dans le *RayFile*. Cette image étant soustraite à l'image brute au cours du processus, il est alors possible de la modifier de façon à lui appliquer l'ouverture désirée pour ensuite que celle-ci apparaisse sur l'image finale. Cette démarche débute par la récupération des informations de calibration de la caméra qui sont nécessaires ici, à savoir le nombre de microlentilles, la position de leurs centres, leurs diamètres, et leur type (Raytrix utilisant trois focales différentes), grâce à la fonction *RxGetGridData*. On réalise ensuite une image sous forme de dessin de ces microlentilles, à la manière de l'image de calibration, sur laquelle on va pouvoir déterminer l'ouverture que l'on souhaite. On effectue ensuite la soustraction entre cette image et l'image blanche afin d'appliquer la nouvelle ouverture au *RayFile*.

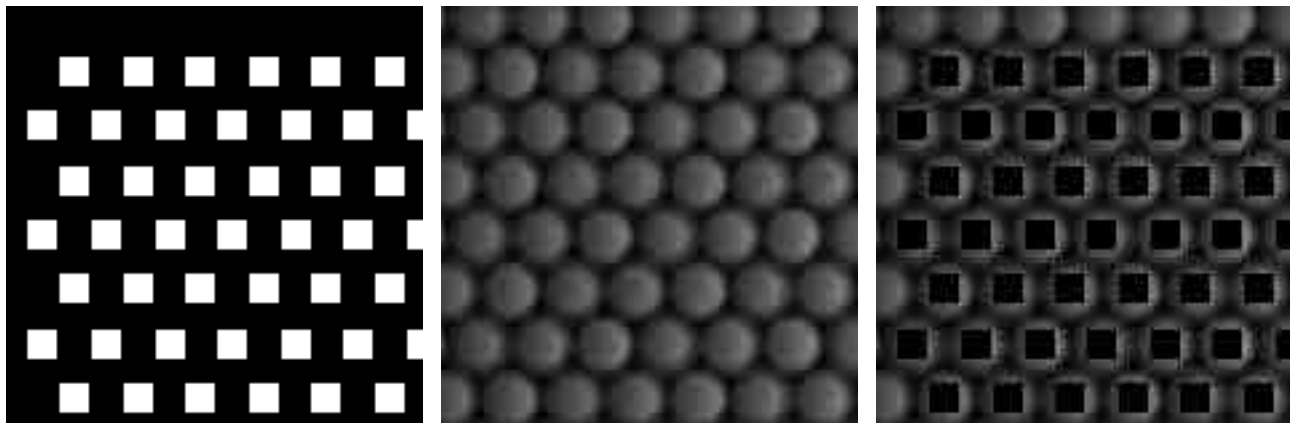


Figure 45 : De gauche à droite : l'image des ouvertures qui a été dessinée, l'image blanche de calibration de la caméra, et la même image une fois les modifications apportées sur l'ouverture. Une simple soustraction suffit à obtenir la dernière image.

III.1.b.2 - Résolution de problèmes

Une fois cette étape effectuée, il est nécessaire à nouveau le *RxPreProcess* afin que la nouvelle image de calibration soit prise en compte. On utilise ensuite quelques fonctions de base telles que *RxSetPar* et *RxRefocusBasic* pour effectuer une mise au point et observer nos résultats. Malheureusement, le système de Raytrix utilise des algorithmes de traitement complexes et dont les actions spécifiques ne sont pas accessibles pour des raisons évidentes de secret industriel. Leur support technique nous a alors conseillé de modifier plutôt l'image *PreProcessed*, soit une fois les manipulations de calibration effectuées, afin d'éviter d'intervenir sur les modifications qu'effectue la fonction *RxPreProcess*. Leurs algorithmes peuvent être assez complexes et ne suivent pas nécessairement les voies standards données par les documents de recherche, c'est pourquoi s'adapter en fonction des résultats est fondamental dans le cadre de notre expérimentation.

Nous avons aussi rencontré un problème pour sauvegarder les images. Une première tentative consistait à lire pixel à pixel et de l'écrire de la même manière. Cependant, les résultats étaient à la fois erronés et déconcertants, bien que nous puissions distinguer des éléments de l'image originelle, mais sans grande précision. On a alors défini un flux de travail consistant à extraire une image du *RayFile*, la sauvegarder avec des fonctions préétablies des bibliothèques de Raytrix, et d'ensuite les manipuler à l'aide d'une application tierce. J'ai pour cela choisi d'utiliser *CImg*¹,

1 Voir <http://cimg.sourceforge.net/> pour de plus amples informations.

librairie libre de droits recommandée par Chrisitan Heinze de Raytrix pour sa facilité d'utilisation et ses larges applications.

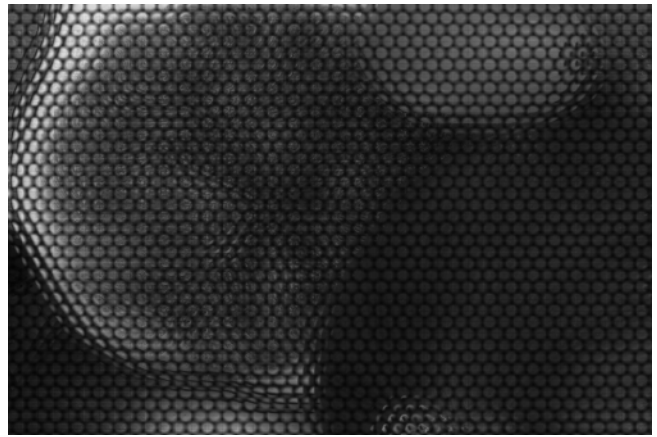
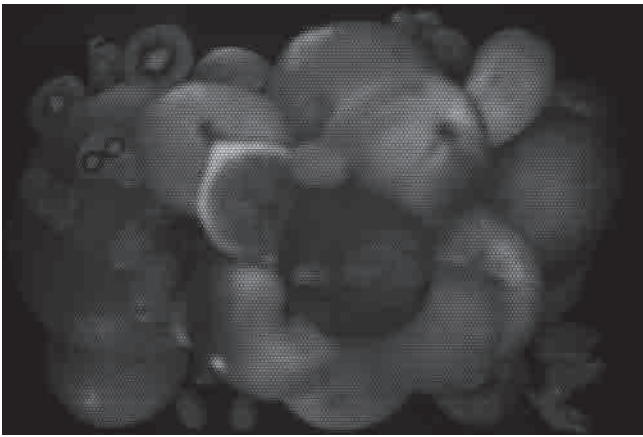
La démarche consistait donc à sauvegarder les images au format PNG¹ afin de ne pas provoquer de perte de données, à les ouvrir avec les fonctions de CImg pour les manipuler aisément, puis à les remplacer dans le *RayFile* avec les fonctions de Raytrix. Cette dernière étape est de loin la plus complexe de ce processus, car elle nécessite la création d'une "fausse" image au format propriétaire de Raytrix, puis à remplacer celle-ci par notre PNG avant de la placer dans le *RayFile*. Cela requiert une gestion minutieuse des formats de pixel, donnée qui ne pose jamais de question à un niveau de simple pratiquant de la photographie. Ici, les pixels sont aussi dans un format propriétaire, mais contiennent concrètement quatre caractéristiques (pour le rouge, le vert, le bleu, et la transparence), au format dit *unsigned char*. Ce dernier peut contenir un caractère qui sera nécessairement un nombre entre 0 et 255, soit un entier sur 8 bits.

Nous avons aussi mis en place une autre expérimentation sans les fonctionnalités propriétaires de Raytrix. Celle-ci utilise la plateforme en ligne ShaderToy² qui permet de générer des rendus sur carte graphique avec une certaine facilité. Cette application utilise le WebGL, permettant de créer facilement des sites ou des applications web utilisant la puissance de la carte graphique et en la programmant avec le langage de programmation GLSL. La démarche ici est d'utiliser les principes empiriques des dispositifs plénoptiques tels qu'exposés plus tôt dans ce mémoire. Concrètement, cela consiste à commencer avec l'image où les microlentilles sont encore accolées puis de progressivement zoomer en elles en moyennant les pixels qui se recouvrent. Plus la distance à laquelle on fait la mise au point augmente, plus l'on augmente la taille des images des microlentilles (en les agrandissant). On parvient ainsi à visualiser tous les différents plans de netteté contenus dans les données de l'image. Les caméras de Raytrix possédant trois focales différentes, il est aussi possible de préciser encore plus l'expérience en définissant des intervalles sur lesquels on utilise chacun des trois types.

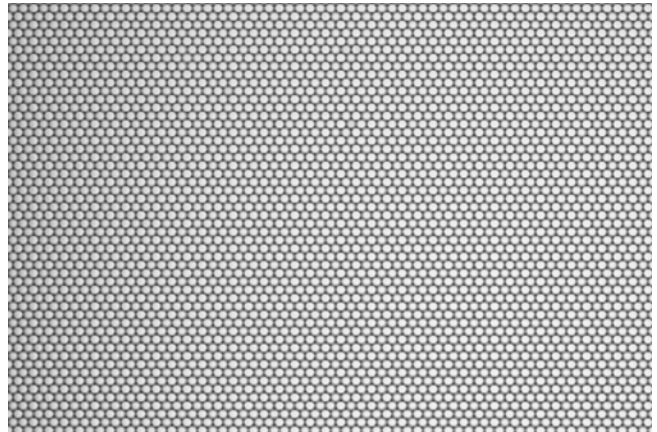
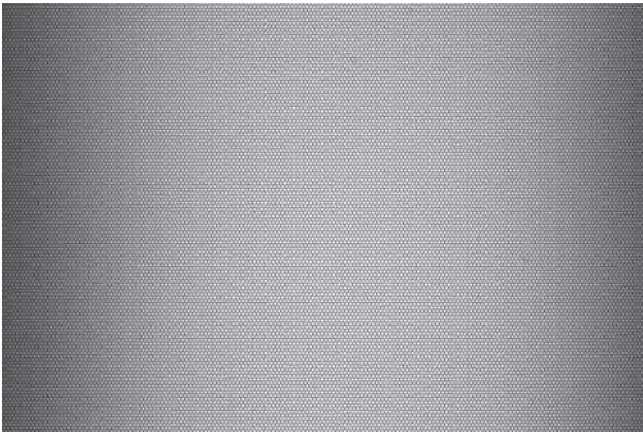
1 Le PNG, pour Portable Network Graphics est un format d'image ouvert à compression sans perte originellement créé pour remplacer le format GIF, lui aussi gérant la transparence, mais étant un format breveté. Le PNG est normalisé par la norme ISO/CEI 15948:2004.

2 Le site <https://www.shadertoy.com/> possède quelques exemples de ce qu'il est possible d'y faire. Il utilise un langage de programmation spécifique aux cartes graphiques et permet de les manipuler depuis son navigateur internet.

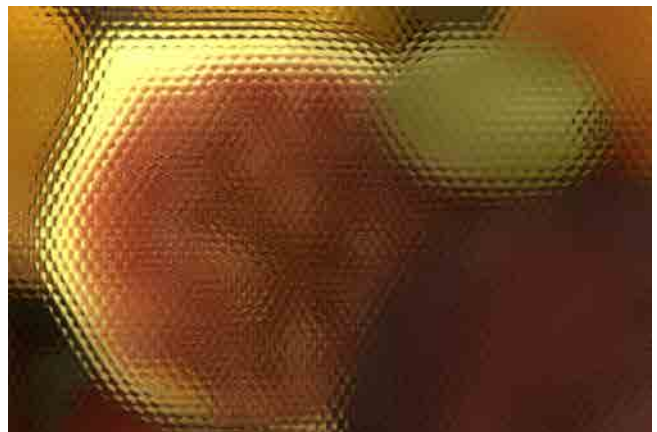
III.1.b.3 - Résultats



L'image raw telle qu'elle est enregistrée par le dispositif : une image en niveaux de gris comportant encore les microlentilles et le vignettage.



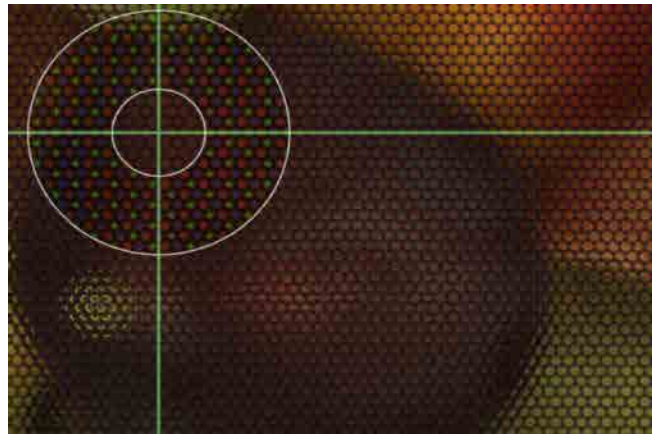
L'image blanche de calibration servant à corriger le vignettage.



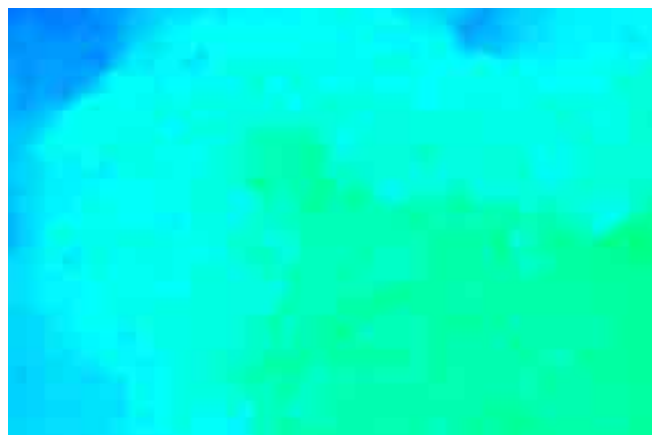
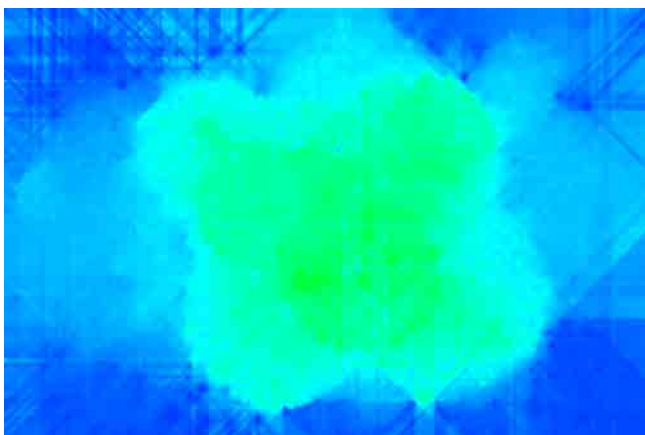
L'image ProcessedNormalized, correspondant à l'image de travail de base. Elle contient toutes les informations disponibles, les lentilles y sont encore apparentes, elle a été corrigée des défauts du dispositif, et ses couleurs ont été définies.



*Etape suivante dans le traitement, l'image RefocusBasic.
C'est simplement une image à la mise au point définie*



*Etape intermédiaire, la CalibrationGrid sert à
connaître la position et le type des microlentilles.*



Une carte de profondeur en couleur : le vert est près, le bleu est éloigné

III.2 - Lytro

III.2.a - Présentation

III.2.a.1 - Dispositif

Suite à la collaboration avec Lytro au Salon de la Photo 2014, Lytro France et leur distributeur ont accepté de me prêter un exemplaire de leur nouveau modèle lancé lors de cet événement : le Illum.

Cet appareil fait suite à la première version, le Lytro dit “tube”, afin d’aborder un marché plus grand public, voire professionnel. Ce boîtier est un monobloc comportant un objectif équivalent à un zoom de 30-250mm, un capteur *light field* de 40 millions de pixels sur 2/3 de pouce, le tout dans un design moderne. Le capteur comporte un réseau de microlentilles disposées en grille (et non en quinconce comme c’est le cas sur la caméra de Raytrix) et fournit des images comportant 4 millions de pixels une fois celles-ci traitées et encodées dans un format conventionnel. On peut donc en déduire que le Lytro Illum comporte neuf photosites par microlentille (soit un carré de 3x3), le facteur 1/10 étant dû à la perte causée par les photosites non utilisables (localisés à la limite de plusieurs lentilles, ou encore non recouverts par l’une d’entre elles).

III.2.a.2 - Logiciel

On dispose ici du logiciel Lytro Desktop, programme officiel du constructeur, qui offre toutes les possibilités d’un logiciel de traitement d’image conventionnel, mais aussi les spécificités propres à l’appareil. Dans la seconde catégorie, on trouve les fonctionnalités suivantes :

- Réglage de l’ouverture, sur une échelle de f/1 à f/16; échelle qui est en réalité complètement virtuelle et qu’il serait plus rigoureux de nommer “taille profondeur de champ” et de la graduer en pourcentages. On l’appellera pseudo-ouverture.
- Sauvegarde d’une carte de profondeur, selon différents paramètres de couleur.
- Bascule; simulation d’une orientation du plan de netteté qui ne serait pas parallèle au plan du capteur (comme exposé plus tôt dans ce mémoire).

-*Focus Spread*; cette fonctionnalité est plus récente et un peu plus avancée, elle consiste à choisir un premier et dernier plan de netteté et ainsi de composer plus précisément la profondeur de champ désirée, le tout aidé par un code de couleur similaire à celui de la carte de profondeur.

-Un ensemble d'animations préconçues afin de pouvoir exporter une vidéo réalisée à partir des fonctionnalités de l'appareil plénoptique (changement de mise au point, changement de point de vue, mais aussi zoom, translation, etc.)

-Différents formats de sortie : image fixe, vidéo, mais aussi format propriétaire Lytro, ou encore *Living Picture* (contenant les différents points de vue, le fichier de calibration, ainsi que la carte de profondeur).

Le principal problème de ce logiciel est qu'il utilise un flou gaussien assez basique pour réaliser la mise au point à posteriori de la prise de vue, et corrèle la taille du noyau de l'algorithme (cf: II.3.c.3) à la pseudo-ouverture choisie; plus celle-ci sera faible, plus le noyau utilisé sera large, et donc plus la quantité de flou sera importante. L'ennui ici est que l'ajout du flou est fait de façon brusque et non progressive, contrairement à l'effet visuel d'un réel objectif. On verra de quelles manières on peut essayer d'y remédier.

On dispose aussi d'une boîte à outils pour Matlab nommé *Light Field Toolbox* et développée par un chercheur australien¹. Celle-ci contient un ensemble de fonctions pour calibrer, corriger, et filtrer les images prises avec un appareil Lytro. Elle permet entre autres de réaliser différentes profondeurs de champ dans une même image, ou encore de la disposer selon un plan qui n'est pas parallèle à celui du capteur.

III.2.a.3 - Données

Les images du Lytro Illum sont contenues dans un format de fichier propriétaire nommé *lfp*. Grâce à la possibilité d'export en *Living Picture* décrit plus tôt, on sait que ce format contient les sept images correspondant aux différents points de vue, la carte de profondeur, ainsi que les paramètres de calibration de l'appareil au format *json*. Le traitement d'une image de Lytro avec le logiciel

¹ DANSEREAU D. Light Field Toolbox v0.4, 12 février 2015. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/49683-light-field-toolbox-v0-4>, consulté le 16 mai 2015.

propriétaire ne requiert pas de précaution spécifique et n'a de plus qu'un intérêt limité dans cette étude.

Les expérimentations les plus poussées se feront donc nécessairement à l'aide de la *Light Field Toolbox* évoquée plus tôt. Celle-ci est compatible aussi bien avec le premier modèle de Lytro qu'avec le Illum, même si la calibration du nouveau modèle est pour le moment proposée à l'état expérimental.

Concernant le flux de travail avec cette boîte à outils, la première étape consiste à mettre en place une base d'images blanches de calibration. Lorsqu'une telle image est fournie à ce logiciel, celui-ci parvient à générer un modèle de l'architecture des microlentilles pour chaque dispositif. Il définit alors leurs positions et leurs centres. Une fois cette étape terminée, il faut maintenant passer au décodage des *light fields*. Pour cela, le programme utilise bien sûr l'image blanche qui est liée au dispositif afin d'avoir la calibration appropriée, et réalise alors une identification des différents plans de netteté, points de vue, et d'autres propriétés. Il est aussi possible, mais optionnel de faire une calibration colorimétrique lors de cette étape (incluant des fonctions simples de réglage du gamma et de la température de couleur). L'auteur recommande ensuite de tester les réglages effectués jusqu'ici grâce à un outil de visualisation intégré. Si cette dernière fonctionne correctement, on peut alors passer aux filtrages et autres opérations qui nous intéressent.

III.2.b - Mise en pratique

III.2.b.1 - Nature de la démarche et objectifs

Notre but ici est d'exploiter la *Light Field Toolbox* pour reconstruire la profondeur de champ dans des images prises avec le Lytro Illum. Nous allons donc essayer de reconstruire des plans de nettetés avec différentes orientations, voire d'en définir plusieurs dans une même image, comme le propose cette boîte à outils. Ces tests seront réalisés à l'aide de différents filtres, dont certains agissant dans le domaine fréquentiel. Il est aussi possible d'influer sur le moyennage des pixels des images correspondants aux différents points de vue.

Cette boîte à outils utilise un système de rendu des *light fields* qui est très similaire à ceux explicités plus tôt dans ce mémoire et conçus par la recherche en informatique graphique. La preuve en est que ce logiciel supporte parfaitement le traitement de *light fields* comme ceux laissés en libre accès par Stanford; ces derniers sont minimalistes, seulement composés d'images étant différents points de vue très rapprochés du sujet et d'informations sur les positions du dispositif de prise de vue. Il est donc totalement logique que le traitement des fichiers Lytro en soit déduit étant donné que, comme exposé plus tôt, ces derniers contiennent des informations très similaires. On remarque qu'ici, la gestion des données est très différente de celle de Raytrix.

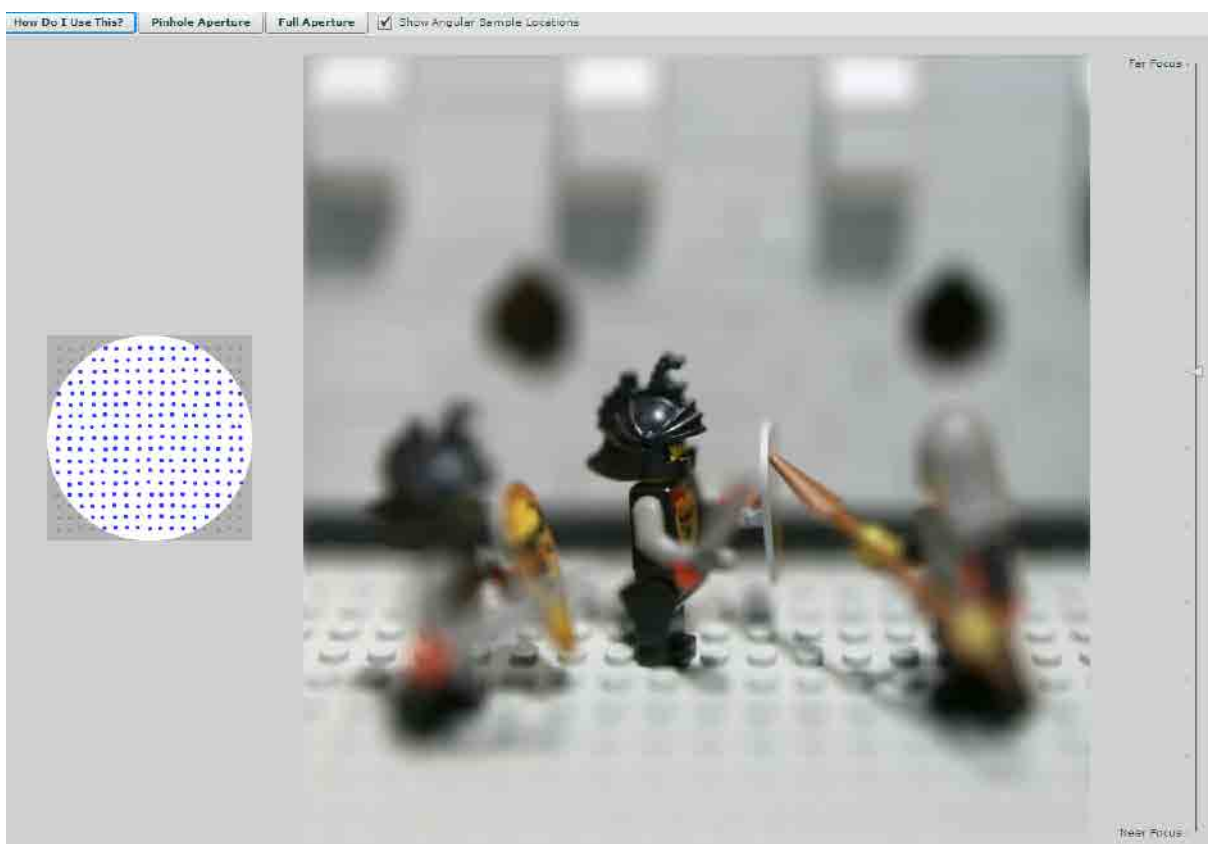


Figure 46 : Un exemple tiré de la Stanford Light Field Archive. Ce visualisateur permet l'observation de light field capturés avec un dispositif conventionnel et un protocole précis comme expliqué plus tôt dans ce mémoire. On distingue à gauche la carte de répartition des différents points de vue associés aux images

Il apparaît donc clairement que cette boîte à outils utilise un système similaire à celui de Lytro Desktop en matière de gestion du flou dans les images, à savoir l'ajout de flou gaussien couplé au calcul d'une carte de profondeur. Cette méthode n'est pas la plus optimale jusqu'ici, mais ce sujet sera plus amplement traité ultérieurement.

III.2.b.2 - Fonctions utilisées dans la boîte à outils

La *Light Field Toolbox* propose de nombreux filtres spécifiques aux images plénoptiques, dont voici quelques éléments intéressants.

Une première catégorie de filtres est celle des filtres en deux dimensions. La boîte à outils propose la création de filtres 2D linéaire ou bien dits *fan-shaped* (littéralement, en forme de ventilateur) dans le domaine fréquentiel. Un filtre linéaire est un outil standard en traitement du signal, alors qu'un filtre *fan-shaped* est plus adapté au traitement des images plénoptiques en raison de sa forme. À noter que l'application de deux filtres linéaires sur respectivement les plans (s,t) et (u,v) de l'image résulte dans le même filtrage qu'une opération réalisée avec un filtre 4D, grâce à sa nature linéaire. Ce n'est cependant pas le cas pour le filtre *fan-shaped*.

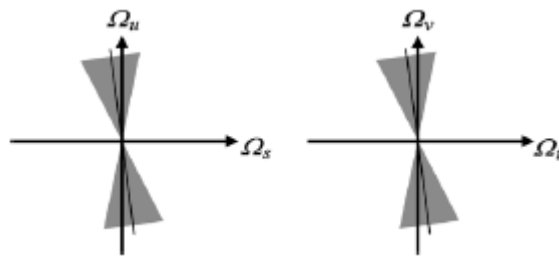


Figure 47 : Représentation d'un filtre dit *fan-shaped*. L'objectif de ce filtre est de simuler une ouverture telle que le diaphragme d'un objectif d'appareil photo, et pour cela applique une forme de double triangle qui s'approche du chemin des rayons lumineux dans ce contexte. Ce schéma représente le même filtrage aussi bien sur les plans (s,t) et (u,v) , mais il n'est pas obligatoire de le réaliser ainsi.

La seconde catégorie correspond aux filtres en quatre dimensions, qui sont les plus utiles pour ces recherches étant donné que les données plénoptiques sont par définition en 4D. On retrouve bien sûr les filtres *fan-shaped* en deux versions; la première, *DualFan*, est en quelque sorte l'addition de deux filtrages 2D exposés précédemment, et la seconde est elle nommée *Hyperfan* et permet de faire le point sur un certain intervalle précis de profondeur, fonctionnalité que Donal Dansereau appelle *volumetric focus* (mise au point volumétrique, en rapport à l'espace en quatre dimensions). Il existe bien entendu un filtre permettant de faire le point de façon plus traditionnelle, ainsi que d'autres offrant la possibilité d'orienter les profondeurs de champ, ainsi que les additionner afin d'en simuler plusieurs dans une même image.

III.2.b.3 - Résultats

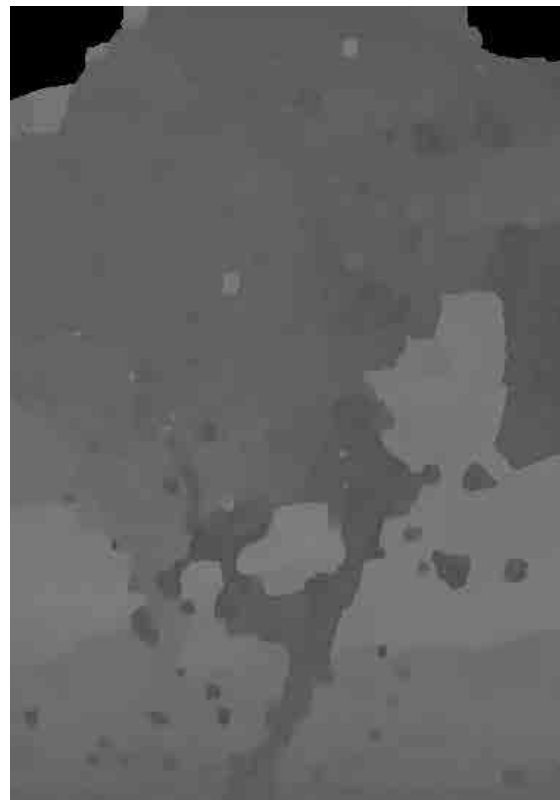


Figure : (De gauche à droite, de haut en bas) La mise au point faite respectivement sur les projections de liquide au premier plan, sur le verre contenant le liquide bleu, sur le verre contenant le liquide rouge, puis la carte de profondeur, dont on peut voir que la précision n'est pas optimale. Bien que plus utilisable dans un contexte photographique, le Lytro Illum n'est pas sans défauts techniques

III.3 - Méthodes expérimentales et ouvertures

III.3.a - Une technique spécifique au plénoptique

III.3.a.1 - Contexte

La principale caractéristique des dispositifs plénoptiques, aussi largement mise en avant par leurs fabricants, n'est autre que la possibilité de refaire la mise au point à posteriori de la prise de vue. Cela est rendu possible grâce à la capture de différents points de vue de la scène photographiée, résultant en une densité d'information élevée. Celle-ci permet, entre autres, le calcul d'une carte de profondeur. Il est évident que le nombre de vues capturées influence directement la qualité du résultat, qui sera meilleure avec un light field comme ceux mis à disposition par l'Université de Stanford (plus de 150 points de vue par scène) qu'avec une image de Lytro (qui en compte visiblement sept).

Ce premier exemple est essentiellement basé sur des techniques d'interpolation entre les différentes vues disponibles, qui est de loin la méthode la plus qualitative pour simuler une profondeur de champ esthétique¹. Dans le cas où le nombre de vues disponibles serait faible, il est possible de calculer des vues intermédiaires, là aussi par interpolation. Cependant, une telle opération demande une puissance de calcul conséquente, et se ferait nécessairement au détriment de la rapidité d'exécution de l'algorithme.

III.3.a.2 - Principe

Cette méthode se concentre sur les données contenues dans les images, et donc ne nécessite pas d'informations tierces au sujet du dispositif de prise de vue ou de la profondeur réelle de la scène. La technique compte trois étapes :

- L'interpolation, qui revient à choisir le point de vue et à le calculer.
- La mise au point, où l'on détermine la profondeur de champ choisie.
- L'échantillonnage, où l'on calcule les parties occultées de la scène.

1 CHAO-TSUNG H., "Fast Realistic Refocusing for Sparse Light Fields," Proc. ICASSP, 2015.

La première étape étant celle nécessitant les calculs les plus importants, elle est généralement simplifiée étant donné que les vues interpolées ne seront pas observées directement, mais simplement utilisée pour le calcul de profondeur qui suit. Cela n'a pas d'influence sur la qualité du flou. À noter aussi que n'importe quelle forme d'ouverture est simulable avec cette technique, mais qu'une faible ouverture donne de meilleurs résultats qu'une ouverture importante



Figure 48 : Les différentes vues d'origine. Ces images ont été prises à l'aide d'un appareil photo sur lequel on a monté un réseau de 25 lentilles produisant autant de sous-images.

Le principal intérêt de cette méthode est la qualité d'image qui en résulte. En effet, l'interpolation de différentes vues fournissant une information très dense concernant les parties occultées, le rendu est le meilleur possible. Calculer et utiliser une carte de profondeur est aussi possible, mais ne tire aucun avantage de l'information contenue dans une image plénoptique; sans compter que la qualité d'une image floutée à partir d'une carte de profondeur est généralement bien moindre.



Figure 49 : Une image obtenue par interpolation (à gauche) et une autre obtenue par utilisation d'une carte de profondeur (à droite). On distingue clairement les artefacts que la seconde méthode produit.

III.3.b - Une méthode utilisant des données de profondeur

III.3.b.1 - Contexte

La notion de carte de profondeur ayant été explicitée plus tôt dans ce mémoire, on sait maintenant qu'il est possible d'en obtenir une à partir de plusieurs vues d'un même sujet, et donc de la calculer à partir de données plénoptiques. En couplant une image à sa carte de profondeur, on peut alors déduire les positions relatives des différents plans, et ajouter du flou dans les endroits choisis, voire même en adapter la quantité relativement à la distance au plan choisi. Cela permet aussi de simuler une faible ouverture qui ne serait pas réalisable à la prise de vue à cause d'une limitation matérielle, par exemple¹.

La résolution de la carte de profondeur est importante, car elle va conditionner la précision de l'algorithme par la suite. Il faut savoir que celle-ci est toujours inférieure à celle des images d'entrée, et que son calcul n'est pas garanti. En effet, selon la nature de la scène et les points de vue, certaines méthodes sont plus efficaces que d'autres; il est donc nécessaire de faire preuve là aussi d'adaptabilité. Bien évidemment, il est primordial d'avoir une image d'entrée avec la profondeur de champ la plus élevée possible.

III.3.b.2 - Algorithme

Cette première étape n'est pas obligatoire, mais a cependant donné de bons résultats. Elle consiste à appliquer un léger filtre passe-bas à la carte de profondeur afin d'éviter la création d'artefacts comme exposés dans la partie précédente. Cette étape est d'autant plus importante si au préalable la carte de profondeur est suréchantillonnée pour être de la même taille que l'image utilisée; dans ce cas l'information qu'elle contient est de base altérée et a donc besoin d'être corrigée, même de façon imparfaite.

La seconde étape consiste à appliquer l'algorithme de flou. La plupart des études incorporent maintenant un modèle simulant une ouverture avec une

¹ HUHLE B., SCHAIRER T., et al. "Realistic Depth Blur for Images with Range Data., in Andreas Kolb & Reinhard Koch", 'Dyn3D', Springer, 2009, pp. 84-95.

certaines taille et une forme déterminée, contrairement aux modèles rudimentaires qui simulent une ouverture type sténopé. Un autre moyen d'éviter la formation d'artefacts dans l'image finale est d'associer un poids aux pixels de l'image d'entrée, qui sera proportionnel à la taille du patch dont ils font partie dans la carte de profondeur. La méthode en elle-même consiste essentiellement à comparer la taille de l'ouverture choisie à la carte de profondeur et ainsi d'en déduire les parties qui seraient normalement occultées dans l'objectif.

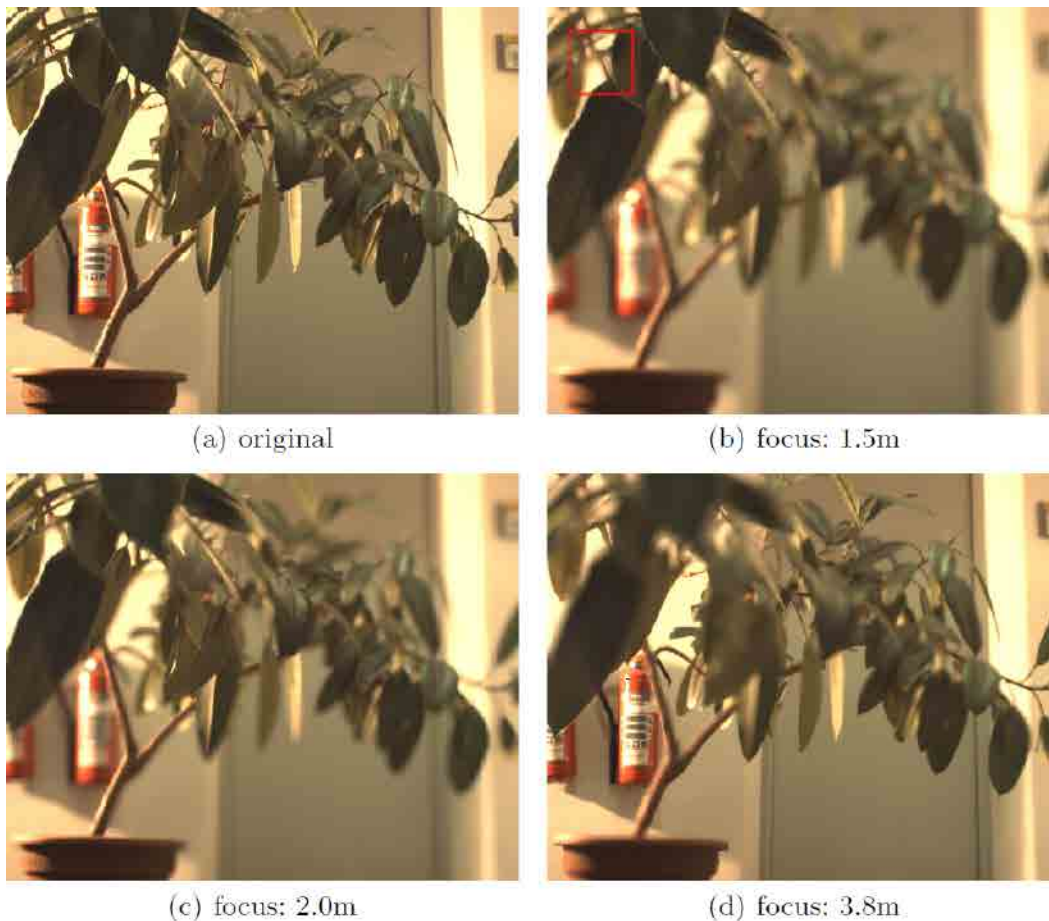


Figure 50 : Un exemple d'application de cet algorithme. On distingue assez peu d'artefacts par rapport à la version précédente de l'application.

Cette méthode a l'avantage d'être plus adaptable, car elle ne nécessite pas la présence de plusieurs vues en entrée, et requiert une puissance de calcul moindre. De plus, en prenant en compte des paramètres photographiques, celle-ci limite la formation d'artefacts, notamment dans le cas où la mise au point serait faite sur un objet très fin.

Conclusion

A travers ce mémoire nous avons tenté de mettre en avant les spécificités des dispositifs plénoptiques, et plus précisément la place que ces derniers occupent par rapport à la photographie et au relief. A terme, l'utilisation de ces dispositifs pourrait grandement simplifier la prise de vue en relief, en plus d'apporter de nouvelles possibilités aussi bien technologiques qu'artistiques. Cependant, il est nécessaire pour cela que la définition de leurs capteurs augmente significativement. De plus, comme nous avons pu le voir, certains défauts concernant la netteté ne sont pas encore complètement résolus.

Les possibilités que cette technologie offre, tel que le choix de mise au point, ou encore la possibilité d'avoir plusieurs vues du sujet capturé connaissent un fort intérêt ces derniers temps. On peut notamment citer les entreprises déjà nommées dans ce mémoire comme Magic Leap ou Pelican Imaging, mais aussi la récente implémentation d'une fonctionnalité de mise au point à posteriori dans l'application de photographie pour smartphone développée par Google¹. L'intérêt autour de ces fonctionnalités ne cessera pas d'augmenter de sitôt de par l'amélioration de la résolution des capteurs et la puissance croissante des smartphones, qui contribuent à les rendre accessibles à un public de plus en plus important, et surtout avide de ce type de nouveautés.

Il faut aussi souligner que les dispositifs plénoptiques sont destinés à s'imposer dans la création de contenu pour écran stéréoscopique étant donné que les deux reposent sur une même base technologique. Les écrans lenticulaires deviennent quant à eux de plus en plus fiables, et l'on pourrait imaginer la conception de tels dispositifs adaptés à une taille de téléphone portable à moyen terme.

Comme exposé en détail précédemment, les caméras plénoptiques ont l'avantage de permettre beaucoup d'applications différentes en un seul dispositif. Ils ont aussi leurs limites, notamment en prise de vue professionnelle où elles sont essentiellement qualitatives. Il paraît nécessaire que les constructeurs s'intéressent significativement au rendu qualitatif des images (le flou n'étant qu'une partie de ce

¹ Voir : <http://googleresearch.blogspot.fr/2014/04/lens-blur-in-new-google-camera-app.html>
Consulté le 18 mai 2015.

domaine), comme dans les exemples cités en ouverture à la fin de ce mémoire. De telles initiatives proviennent généralement d'institutions moins réputées que les créatrices des technologies sus-citées, ce qui traduit le manque d'attention que les constructeurs ont à l'égard des utilisateurs, rupture aussi évoquée plus tôt. On peut cependant espérer que cette attitude change à l'avenir, l'innovation technologique étant à la fois faite d'inspiration scientifique et d'une application spécifique. Si cette dernière n'est pas totalement satisfaite, alors la technologie en question passera quelque temps à chercher sa place, et c'est précisément ce qui semble se passer avec le plénoptique.

Ce statut latent est parfaitement reflété par le concept de "science en train de se faire" exposé par Abraham Moles¹, décrivant "un champ des possibles tout découpé et circonscrit, à chaque instant, par toute une série de murs séparant le possible de l'impossible, le concevable de l'inconcevable", à mettre en opposition avec ce qu'il appelait "la science établie" comme étant l'ensemble des connaissances scientifiques alors contrôlées par la logique et le consensus des ses auteurs et lecteurs. Cette technologie ouvre des portes, elle n'a certainement pas atteint sa forme finale, ses possibilités sont certainement sous-exploitées, mais l'innovation peut aussi venir de ses utilisateurs, comme cela a régulièrement été le cas dans l'histoire de l'image.

1 MOLES A. *Les sciences de l'imprécis*. Points Sciences, Editions du Seuil, 2005.

Bibliographie

Articles relatifs à la recherche:

ADELSON E., BERGEN J. “The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision”, *MIT Press*, 1991, pp. 3 - 20.

ADELSON E., WANG J. “Single Lens Stereo with a Plenoptic Camera”, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, February 1992, Vol. 14, No. 2.

CHAO-TSUNG H., “Fast Realistic Refocusing for Sparse Light Fields,” Proc. ICASSP, 2015.

DANSEREAU D., BRUTON L. A 4-D Dual-Fan Filter Bank for Depth Filtering in Light Fields. *Signal Processing, IEEE Transactions on (Volume:55 , Issue: 2)*, février 2007.

DAVIS A., LEVOY M., DURAND F. 2012. Unstructured Light Fields. *Comp. Graph. Forum* 31, 2pt1 (May 2012), 305-314

DOWSKI E., CATHEY W. “Extended Depth of Field Through Wave-Front Coding”, *Optical Society of America*, 10 April 1995 , Vol. 34, No. 11.

DOWSKI E., JOHNSON G. “Wavefront Coding: A Modern Method of Achieving High Performance and/or Low-Cost Imaging Systems”, *Optical Society of America*, 10 April 1995 , Vol. 34, No. 11.

GERSHUN A. “The Light Field”, Moscow, 1936, trans. by P. Moon and G. Timoshenko, *J. Math. and Physics*, 1939, vol. 18, pp. 51–151.

GEORGIEV T., LUMSDAINE A. “The Focused Plenoptic Camera”, ICCP, April 2009.

GEORGIEV T., LUMSDAINE A. “Superresolution with Plenoptic 2.0 Cameras”, *Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV/Fall 2009 OSA Optics & Photonics Technical Digest*, Fall 2009.

GUNTURK B. et al. “Demosaicking: Color Filter Array Interpolation”, *IEEE signal processing magazine*, January 2005, p. 44.

HIRSCH M. et al. “Compressive Light Field Projection System” *SIGGRAPH ACM Transactions on Graphics*, 2014, Vol. 33, n.4, pp.1-12.

HUHLE B., SCHAIRER T., et al. “Realistic Depth Blur for Images with Range Data”, in Andreas Kolb & Reinhard Koch, ‘Dyn3D’, Springer, 2009, pp. 84-95.

KOSLOFF T., BARSKY B., “Two New Approaches to Depth-of-Field Post-processing - Pyramid Spreading and Tensor Filtering.”, Paul Richard & José Braz, ed., ‘VISAPP (1)’, INSTICC Press, , pp. 9-18, 2010.

LEVOY M. “Light Field Photography and Videography”, lecture at the University of Virginia, October 18, 2005.

LEVOY M., HANRAHAN P. “Light Field Rendering”. *ACM Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1996, pp. 31-42.

LEVOY M. et al. “Recording and Controlling the 4D Light Field in a Microscope Using Microlens Arrays”, *Journal of Microscopy*, 2009, Vol. 235, Pt 2, pp. 144–162.

LEVOY M., et al. “Light Field Microscopy”. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2006, Vol. 25, n.3.

LIPPMANN G. “Epreuves réversibles donnant la sensation du relief”, *Académie des sciences*, séance du 2 mars 1908.

NG R., LEVOY M., BREDIF M, “Light Field Photography with a Hand-Held Plenoptic Camera.” Stanford University Computer Science Tech Report CSTR,

février 2005.

NG R. “Fourier slice photography.” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2005, Vol. 24, No. 3.

NG R. “Digital light field photography.” PhD dissertation, 2006, Stanford University.

PERWAß C., WIETZKE L. “Single lens 3D-camera with extended depth-of-field”, *IS&T/SPIE Electronic Imaging, International Society for Optics and Photonics*, February 2012.

VAISH V. et al. “Synthetic Aperture Focusing using a Shear-Warp Factorization of the Viewing Transform”, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, June 2005, Vol. 3, p.129.

WETSZTEIN G. et al. “Tensor Displays: Compressive Light Field Synthesis using Multilayer Displays with Directional Backlighting”, *SIGGRAPH, ACM Transactions on Graphics*, 2012, Vol.31, n.4. 2012.

Articles relatifs aux applications technologiques:

ADAMS A. et al. “The Frankencamera: an experimental platform for computational photography”, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2010, Vol.29, no. 4, p.29.

LANMAN D. et al. “Near-eye light field displays”, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2013, Vol.32, n.6, p.220.

MORILLON L. “Photographie plénoptique, ce qu’il faut savoir...”, *Le Monde de l’Image*, no. 95, 2015 (bimestriel), p.50-51.

NG R. et al. “Light field photography with a hand-held plenoptic camera”, *Computer Science Technical Report CSTR 2*, 2005, no. 11.

VENKATARAMAN K. et al. "PiCam: an ultra-thin high performance monolithic camera array", *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2013, Vol.32, n.6, p.166.

Ressources en ligne :

ROBERTS D., SMITH T. *The History of Integral Print Methods*, un extrait de "Lens Array Print Techniques" http://www.integralresource.org/Integral_History.pdf, 2003.

TIMBY K. « *Images en relief et images changeantes* », Études photographiques, 9 Mai 2001, [En ligne], mis en ligne le 09 février 2005. URL : <http://etudesphotographiques.revues.org/246>. consulté le 09 mai 2015.

HAYES J. "You see them WITH glasses!"... *A Short History of 3D Movies*, *Widescreen Movies Magazine*, mis en ligne le 9 juin 2002 et mis à jour le 14 septembre 2014. URL : <http://widescreenmovies.org/WSM11/3D.htm>. Consulté le 09 mai 2015.

DANSEREAU D. Light Field Toolbox v0.4, 12 février 2015. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/49683-light-field-toolbox-v0-4>, consulté le 16 mai 2015.

Livres:

DESCARTES R. *Discours de la Méthode, plus La dioptrique, Les météores et La géométrie*, Editions de l'Académie des Sciences, 1637, première publication en 1956.

HOWARD I.P. *Perceiving in Depth, Volume 1*, Oxford University Press, 24 février 2012.

MOLES A. *Les sciences de l'imprécis*. Points Sciences, Editions du Seuil, 2005.

NAKAMURA J. *Image Sensor and Signal Processing for Digital Still Cameras*, Taylor and Francis Group, LLC. 2006.

PARKER. J. R. *Algorithms for Image Processing and Computer Vision, Second Edition*, Wiley Publishing Inc. 2011.

ROBERTS . et al. *The History of Integral Print Methods*, An excerpt from: *Lens Array Print Techniques*, online publishing, March 21, 2006.

RASKAR R., TUMBLIN J. *Computational Photography: Mastering New Techniques for Lenses, Lighting, and Sensors*, A K Peters/CRC Press, 2009.

da VINCI L. *Notebooks*, Oxford University Press, 2008, première publication en 1952.

Ressources vidéos:

LEVOY M. Light Field Photography and Microscopy. Stanford University, Computer Science Department, March 23, 2009.

HAMPRECHT F. Light Fields and Compressive Sensing. *Universität Heidelberg, Image Analysis Class, 2013.*

PERWAß C., Single-Lens 3D Camera with Extended Depth of Field, *Spectronet Conference 2012.*

Brevets :

U.S. Patent 725,567, “*Parallax Stereogram and Process of Making Same*”, application filed 25 September 1902, patented 14 April 1903

U.S. Patent 1,905,716, “*Making stereoscopic parallax panoramagrams from pseudoscopic parallax panoramagrams*”, patented 25 April 1933

U.S. Patent 2,724,312, “*Means for obtaining three-dimensional photography*”, patented 22 November 1955

Table des illustrations

Figure 1, page 8 : Portsmouth Natural History Museum

Figure 2, page 10 : Extrait de da VINCI L. *Notebooks*, Oxford University Press, 2008, première publication en 1952.

Figure 3, page 12 : Extrait de da VINCI L. *Notebooks*, Oxford University Press, 2008, première publication en 1952

Figure 4, page 13 : Extrait de GERSHUN A. “*The Light Field*”, Moscow, 1936, trans. by P. Moon and G. Timoshenko, *J. Math. and Physics*, 1939, vol. 18, pp. 51–151.

Figure 5, page 16 : Extrait de LEVOY M., HANRAHAN P. “*Light Field Rendering*”. ACM Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1996, pp. 31-42.

Figure 6, page 16 : Extrait de LEVOY M., HANRAHAN P. “*Light Field Rendering*”. ACM Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1996, pp. 31-42.

Figure 7, page 18 : Extrait de ROBERTS D., SMITH T. *The History of Integral Print Methods*, un extrait de “*Lens Array Print Techniques*” http://www.integralresource.org/Integral_History.pdf, 2003.

Figure 8, page 19 : Tableaux de Gaspard Antoine de Bois Clair, collection privée.

Figure 9, page 19 : Tableaux de Gaspard Antoine de Bois Clair, collection privée.

Figure 10, page 19 : Tableaux de Gaspard Antoine de Bois Clair, collection privée.

Figure 11, page 20 : Extrait de U.S. Patent 725,567, “*Parallax Stereogram and Process of Making Same*”, application filed 25 September 1902, patented 14 April 1903

Figure 12, page 23 : Wikimedia Creative Commons.

Figure 13, page 24 : Réalisation de Maurice Bonnet, La Relièrographie, publicité pour Alsa, photographie en relief : gélatino-bromure d’argent sur verre et réseau ligné vertical sur verre, boîte d’éclairage avec peinture polychrome et sachet de levure, 40 x 30 x 0,8 cm (image), v. 1937-1940.

Figure 14, page 24 : © de l’image journal l’Express N° 863,1-7 janvier 1968, rubrique “*Technique*”, article de Gérard BONNOT.

Figure 15, page 25 : Extrait de ROBERTS D., SMITH T. *The History of Integral Print Methods*, un extrait de “*Lens Array Print Techniques*” http://www.integralresource.org/Integral_History.pdf, 2003.

Figure 16, page 26 : Extrait de ROBERTS D., SMITH T. The History of Integral Print Methods, un extrait de “Lens Array Print Techniques” http://www.integralresource.org/Integral_History.pdf, 2003.

Figure 17, page 28 : © Warner Bros. Pictures.

Figure 18, page 30 : © Binocle 3D

Figure 19, page 33 : Wikimedia Creative Commons

Figure 20, page 35 : Extrait de ADELSON E., WANG J. “*Single Lens Stereo with a Plenoptic Camera*”, IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, February 1992, Vol. 14, No. 2.

Figure 21, page 36 : Extrait de LEVOY M., HANRAHAN P. “*Light Field Rendering*”. ACM Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1996, pp. 31-42.

Figure 22, page 37 : © Raytrix GmbH

Figure 23, page 39 : Extrait de GEORGIEV T., LUMSDAINE A. “*Superresolution with Plenoptic 2.0 Cameras*”, Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV/Fall 2009 OSA Optics & Photonics Technical Digest, Fall 2009.

Figure 24, page 39 : Extrait de GEORGIEV T., LUMSDAINE A. “*Superresolution with Plenoptic 2.0 Cameras*”, Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV/Fall 2009 OSA Optics & Photonics Technical Digest, Fall 2009.

Figure 25, page 41 : Capture de LEVOY M. Light Field Photography and Microscopy. Stanford University, Computer Science Department, March 23, 2009.

Figure 26, page 42 : Extrait de WETSZTEIN G. et al. “Tensor Displays: Compressive Light Field Synthesis using Multilayer Displays with Directional Backlighting”, SIGGRAPH, ACM Transactions on Graphics, 2012, Vol.31, n.4. 2012.

Figure 27, page 43 : Extrait de WETSZTEIN G. et al. “Tensor Displays: Compressive Light Field Synthesis using Multilayer Displays with Directional Backlighting”, SIGGRAPH, ACM Transactions on Graphics, 2012, Vol.31, n.4. 2012.

Figure 28, page 46 : © Lytro Inc.

Figure 29, page 48 : © Berkeley University

Figure 30, page 49 : Extrait de LEVOY M., et al. “*Light Field Microscopy*”. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2006, Vol. 25, n.3.

Figure 31, page 50 : © Raytrix GmbH

Figure 32, page 51 : © Lytro Inc.

Figure 33, page 52 : © Raytrix GmbH

Figure 34, page 54 : Wikimedia Creative Commons

Figure 35, page 55 : © P.Martin - ENS Louis Lumière

Figure 36, page 56 : © Todor Georgiev

Figure 37, page 58 : Wikimedia Creative Commons

Figure 38, page 60 : Wikimedia Creative Commons

Figure 40, page 61 : Wikimedia Creative Commons

Figure 39, page 61 : Wikimedia Creative Commons

Figure 41, page 62 : © Mario Klingemann

Figure 42, page 63 : Capture d'écran d'Adobe Photoshop, © Adobe

Figure 43, page 66 : Capture d'écran de RxLive, © Raytrix GmbH

Figure 44, page 67 : Schéma du SDK de Raytrix, © Raytrix GmbH

Figure 45, page 69 : Images extraites de mon flux de travail

Figure 46, page 76 : © Donald Dansereau

Figure 47, page 77 : Extrait de DANSEREAU D., BRUTON L. *A 4-D Dual-Fan Filter Bank for Depth Filtering in Light Fields*. Signal Processing, IEEE Transactions on (Volume:55 , Issue: 2), février 2007.

Figure 48, page 80 : Extrait de CHAO-TSUNG H., "Fast Realistic Refocusing for Sparse Light Fields," Proc. ICASSP, 2015.

Figure 49, page 80 : Extrait de CHAO-TSUNG H., "Fast Realistic Refocusing for Sparse Light Fields," Proc. ICASSP, 2015.

Figure 50, page 82 : Extrait de HUHLE B., SCHAIRER T., et al. "Realistic Depth Blur for Images with Range Data", in Andreas Kolb & Reinhard Koch, 'Dyn3D', Springer, 2009, pp. 84-95.

Annexes

Annexe 1 : Planche contact des images réalisées avec la caméra Raytrix R8





Annexe 2 : planche contact des images réalisées avec le Lytro Illum





R42/R10/R8 3D Light Field Camera

for professional Applications

Machine Vision | Microscopy | Life Science | R&D | Education | Flow Mechanics | Video | Medical | Computational Photography

- Models**
- R42-Micro-Color: F/2.8, 41.5 Megapixels, 7 FPS
 - R42-Color: F/2.8, 41.5 Megapixels, 7 FPS
 - R10-Minor: F/2.8, 10 Megapixels, 7 FPS
 - R8-Color: F/2.8, 8 Megapixels, 30 FPS

- Light Field Sensor**
- R42: 41.5 Megapixels, 10 MP effective lateral resolution
 - high dynamic range (HDR), 2/3" sensor class, back side illuminated pixel (BSI)

Integration time

- R8 (4k): min. 8µs; R42 (Full resolution): min. 16µs

- Speed**
- R42: 7 FPS at 10 MP (optional R8: 30 FPS at Full HD)

Body

- dimensions: 39mm (W), 39mm (H), 28mm (D), weight: 71g, case material: aluminium
- award winning design, tripod adaptor

Interface

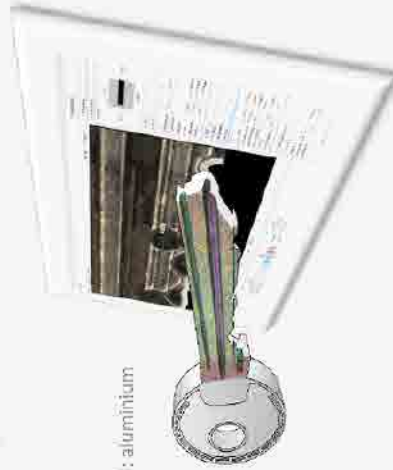
- USB 3.0 superspeed (micro-B with screw lockers)
- external hardware trigger input

Optics

- micro lens array (MLA) with aperture F/2.8
- optional R42-microscopy version with aperture F/2.3
- 6x extended depth of field (Dof)
- changeable C-mount standard lens

Power consumption

- Powered by USB 3.0 cable
- 350mA (800mA peak)



www.raytrix.de

Annexe 4 : Code C++ utilisant le SDK de Raytrix

```
// The Raytrix exception class base type
#include "Rx.Interop.Runtime30/CIException.h"
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <string>
#include "stdafx.h"
#include "CImg.h"

// The Raytrix Light Field API
#include "Rx.ApiLF\Rx.ApiLF.h"
#include "Rx.FileIO\Rx.FileIO.Image.h"

using namespace Rx::ApiLF;
using namespace Rx;
using namespace cimg_library;

void drawCircle(unsigned char *Image, int w, int h, int col, double x, double y, float r){
    int a, b;
    for (a = int(x - r); a <= int(x + r); a++)
        for (b = int(y - r); b <= int(y + r); b++)
            if (((a-x)*(a-x)) + ((b-y)*(b-y)) <= (r*r))
                Image[b*w + a] = col;
}

void drawSquare(unsigned char *Image, int w, int h, int col, double x, double y, float r){
    int a, b, c;
    c = r-5;
    for (a = int(x - c); a <= int(x + c); a++)
        for (b = int(y - c); b <= int(y + c); b++)
            Image[b*w + a] = col;
}

void drawCross(unsigned char *Image, int w, int h, int col, double x, double y, float r){
    int a, b, c;
    c = r - 2;
    for (a = int(x - c); a <= int(x + c); a++)
        Image[int(y)*w + a] = col;
    for (b = int(y - c); b <= int(y + c); b++)
        Image[b*w + int(x)] = col;
}

int main(int argc, char* argv[])
{
    unsigned int uImgID = 0;
    CRxString sxFile, sxFile2, sxFile3, sxFile4;
    CRxImage xImage, xImage2;
    try
    {
        // Initialize Raytrix Library
        RxInit(true, 0);
    }
}
```

```

// Automatic CUDA device selection if no device ID or a negative device ID is given.
RxCudaSelectDevice();
// Construct path to ray image
sxFile = "FruitBasket.ray";

// Load a ray image
uImgID = RxRayLoad(sxFile);

// Bind the loaded ray image. This copies the ray image to the CUDA device.
RxRayBind(uImgID);
// Pre-process raw Light Field image before calling any processing functions
RxPreProcess();
// Focus ray image to plane at depth 0.5
RxSetPar(EPar::Focus_RelativeFocusPlane, 0.5);

RxRefocusBasic();
// Get focused image from CUDA device
//
//RxGetImage(EImgID::RefocusBasic_VirtualSpace, xImage);
// Now work with the image.

// ...

// Compute the raw depth map --> this step is independent of the current
target space (Rx::ApiLF::EPar::Proj_CurrentTargetView)
// Creates the Rx::ApiLF::EImg::DepthRay image on the CUDA device
Rx::ApiLF::RxDepthRay();
// After the raw depth map is computed the target space is important to
determine in which space the depth values should be fused.
Rx::ApiLF::RxSetPar(Rx::ApiLF::EPar::Proj_CurrentTargetView, (unsigned
int) Rx::Projection::ESpace::ViewCamera);

//Compute and create the Rx::ApiLF::EImg::DepthMap_ViewCamera image
on the CUDA device

Rx::ApiLF::RxDepthMap();
//Lastly compute the total focus image on the basis of the newly created depth
map

Rx::ApiLF::RxTotalFocus();

sxFile3 = "Processed_Normalized.png";
RxGetImage(EImgID::Processed_Normalized, xImage2);
printf("Saving Processed_Normalized image as '%s'.\n", sxFile3.ToCString());
Rx::FileIO::CImage xImageFile2;
xImageFile2.Write(&xImage2, sxFile3);

//Calibration image
CRxArrayDouble LensC0,LensC1,LensC2;
float LensR0,LensR1,LensR2;
RxGetGridData(LensC0, LensR0, 0);
RxGetGridData(LensC1, LensR1, 1);
RxGetGridData(LensC2, LensR2, 2);
int w, h;
RxGetImage(EImgID::White, xImage);

```

```

xImage.GetSize(w, h);
std::ofstream f("Cal.pgm");
unsigned char* Centers = new unsigned char[w*h];
for (int i = 0; i < w*h; i++)
    Centers[i] = 0;
for (int i = 0; i < LensC0.Length(); i += 2){
    int x = LensC0[i];
    int y = LensC0[i + 1];
    drawSquare(Centers, w, h, 255, x, y, LensR0);
}

for (int i = 0; i < LensC1.Length(); i += 2){
    int x = LensC1[i];
    int y = LensC1[i + 1];
    drawSquare(Centers, w, h, 255, x, y, LensR1);
}

for (int i = 0; i < LensC2.Length(); i += 2){
    int x = LensC2[i];
    int y = LensC2[i + 1];
    drawSquare(Centers, w, h, 255, x, y, LensR2);
}
f << "P5 " << w << " " << h << " 255\n";
f.write((char *)Centers, w*h);
f.close();
system("convert Cal.pgm Cal.png");

//Saving white image
sxFile2 = "Raw.png";
printf("Saving image as '%s'...\n", sxFile2.ToCString());
Rx::FileIO::CImage xImageFile;
RxGetImage(EImgID::Raw, xImage2);
xImageFile.Write(&xImage2, sxFile2);

sxFile2 = "White.png";
printf("Saving image as '%s'...\n", sxFile2.ToCString());
RxGetImage(EImgID::White, xImage2);
xImageFile.Write(&xImage2, sxFile2);

//Modifying the white image
CImg<unsigned int> white("Raw.png");
CImg<unsigned int> cal("Cal.png");
for (int i = 0; i < white.width(); i++){
    for (int j = 0; j < white.height(); j++){
        if (cal(i, j, 0) > 0){
            white(i, j, 0) = white(i, j, 0) - cal(i, j, 0);
            if (white(i, j, 0) < 0){
                white(i, j, 0) = 0;
            }
        }
    }
}
white.save("RawModified.png");

```

```

CImg<unsigned int> white2("Raw.png");
for (int i = 0; i < white2.width(); i++){
    for (int j = 0; j < white2.height(); j++){
        if (cal(i, j, 0) > 0){
            white2(i, j, 0) = white2(i, j, 0) - cal(i, j, 0);
            if (white2(i, j, 0) < 0){
                white2(i, j, 0) = 0;
            }
        }
    }
}
white.save("WhiteModified.png");

```

```

//Retrieving data type
RxGetImage(EImgID::Raw, xImage2);
Rx::Interop::Runtime28::EPixelType::ID PType;
Rx::Interop::Runtime28::EDataType::ID DType;
xImage2.GetType(PType, DType);
CRxString PixelType = Rx::CRxImageFormat::PixelFormat2String(PType);
CRxString datatype = Rx::CRxImageFormat::DataType2String(DType);
std::cout << PixelType.ToCString() << std::endl;
std::cout << datatype.ToCString() << std::endl;

```

```

//Setting the fake white image
CRxImage WhiteFake;
WhiteFake.Create(w, h, Rx::Interop::Runtime28::EPixelType::ID::BayerGR,
Rx::Interop::Runtime28::EDataType::ID::UByte);

```

```

//Making the fake white image
TPixel_Bay_GR_uc pix;
double tempR, tempG, tempB;

```

```

for (int i = 0; i < w; i++){
    for (int j = 0; j < h; j++){
        tempR = white(i, j, 0);
        //tempG = whitebis(i, j, 0, 1);
        //tempB = whitebis(i, j, 0, 2);
        pix.r() = tempR;
        pix.g() = tempR;
        pix.b() = tempR;
        pix.a() = tempR;
        WhiteFake.SetPixel(pix, i, j);
    }
}

```

```

RxSetImage(EImgID::Raw, &WhiteFake);
sxFile3 = "RawSavingTest.png";
RxGetImage(EImgID::Raw, xImage2);
printf("Saving Test Raw image as '%s'..\n", sxFile3.ToCString());
xImageFile2.Write(&xImage2, sxFile3);

```

```

RxGetImage(EImgID::White, xImage2);

```

```

xImage2.GetType(PType, DType);
PixelType = Rx::CRxImageFormat::PixelType2String(PType);
datatype = Rx::CRxImageFormat::DataType2String(DType);
std::cout << PixelType.ToCString() << std::endl;
std::cout << datatype.ToCString() << std::endl;*/
for (int i = 0; i < w; i++){
    for (int j = 0; j < h; j++){
        tempR = white2(i, j, 0);
        //tempG = whitebis(i, j, 0, 1);
        //tempB = whitebis(i, j, 0, 2);
        pix.r() = tempR;
        pix.g() = tempR;
        pix.b() = tempR;
        pix.a() = tempR;
        WhiteFake.SetPixel(pix, i, j);
    }
}
RxSetImage(EImgID::White, &WhiteFake);
sxFile3 = "WhiteSavingTest.png";
RxGetImage(EImgID::White, xImage2);
printf("Saving Test White image as '%s'...\n", sxFile3.ToCString());
xImageFile2.Write(&xImage2, sxFile3);

sxFile4 = "Test.xml";
Rx::ApiLF::RxRayCalibSaveXML(uImgID, sxFile4);

std::cout << "GetChar" << std::endl;
getchar();

{
    std::ofstream calib("calib.csv");
    for (int i = 0; i < LensC0.Length(); i += 2)
        calib << 0 << "," << LensC0[i] << "," << LensC0[i + 1] << ","
<< LensR0 << "\n";

    for (int i = 0; i < LensC1.Length(); i += 2)
        calib << 1 << "," << LensC1[i] << "," << LensC1[i + 1] << ","
<< LensR1 << "\n";

    for (int i = 0; i < LensC2.Length(); i += 2)
        calib << 2 << "," << LensC2[i] << "," << LensC2[i + 1] << ","
<< LensR2 << "\n";

    calib.close();
}

}

catch (Rx::Interop::Runtime30::CIException& xEx)
{
    return -1;
}
// Close Raytrix API, free all memory on host and CUDA device
// and close all open cameras.
RxFinalize();
return 0;
}

```


Annexe 5 : Code GLSL pour Shadertoy

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>

<shadertoy version="1.0">

  <info name="lightfield7" date="2015" author="mb" link="http://recherche.ign.fr/labos/matis/~bredif">
  <comments>Light field viewer : Multi-lens basic refocus, taking into account the 3 lens types (res 1:1)</
comments>
  </info>

  <textures>
    <texture id="0" src="lf.png"/>
    <texture id="1" src="psf.png"/>
    <texture id="2" src=""/>
    <texture id="3" src=""/>
  </textures>

  <shader>
#extension GL_EXT_shader_texture_lod : enable

#ifdef GL_ES
precision highp float;
#endif
#ifdef GL_ES
precision highp float;
#endif

uniform float time;
uniform vec2 resolution;
uniform vec4 mouse;
uniform sampler2D tex0;
uniform sampler2D tex1;

float diameter = 23.530998229981;
float border = 1.000000000000;
float radius = 0.5*diameter-border;
mat2 L1 = mat2(1.000000000000,-0.000000087423,0.500000059605,0.866025328636); // lens_base
mat2 L2 = mat2(1.0000e+00,1.0095e-07,-5.7735e-01,1.1547e+00); // inv(L1)

vec2 res = vec2(4016.,2688.);
vec2 center = 0.5*res + vec2(4.5,-5.); // je ne sais pas d'où vient cet offset, choisi empiriquement

vec2 dx = (L2*(vec2(res.x,0.))/diameter);
vec2 dy = (L2*(vec2(0.,res.y))/diameter);

// this is the virtual depth
const int N = 10; // N-nearest neighbors
float Mmax = 10.;
float M = 1.+(Mmax-1.)*0.5*(1.-cos(0.5*time));
```

```

float cutoff = 1.;
float expcutoff = exp(-1.);

//vec2 lens_M0 = vec2(2,8,3.5);
//vec2 lens_M1 = vec2(3.,4.);
vec2 lens_M0 = vec2(2.,3.5);
vec2 lens_M1 = vec2(3.,4.);
vec4 wtype0 = vec4(vec3(0.002),0.003);
float psf_bias = log2(750.);

void sample(inout vec4 col, in vec2 pix, in vec2 l, in int x, in int y)
{
    l += vec2(x,y);

    //if(mod(l.x,Mmax)!=0. || mod(l.y,Mmax)!=0.) return;

    int lenstype = int(mod(l.x+2.*l.y+1.,3.));
    vec2 w = clamp((M-lens_M0)/(lens_M1-lens_M0),0.,1.);
    vec4 wtype = vec4(1.);//wtype0+((lenstype==0) ? 1.-w[0] : (lenstype==1) ? w[0]-w[1] : w[1]);
// lens center in raw
    vec2 c = diameter*L1*1+center;
    vec2 off = (pix-c)/M;
    vec2 d = off/(cutoff*radius);
    float d2 = dot(d,d);
    if(d2>1.) return;
    float woff_gauss = exp(-d2)-expcutoff;
    //float wpsf = 1.-cos(d2*d2*radians(360.));
    vec2 uv1 = 0.5*(1.+vec2(d.x,-d.y));

    //vec4 wpsf = woff_gauss*texture2D(tex1,uv1);
    vec4 mean = texture2DLodEXT(tex1,uv1,psf_bias);
    vec4 wpsf = woff_gauss*texture2DLodEXT(tex1,uv1,psf_bias-log2(M));
    vec2 raw = c+off;
    vec2 uv0 = vec2(raw.x,res.y-raw.y)/res;

    col += wpsf/mean*wtype*texture2D(tex0,uv0);
}
void main(void)
{
// integer pixel relative to viewing center
    vec2 pix = gl_FragCoord.xy;

// pan with mouse
    pix += mouse.xy * (res-resolution)/resolution;
    //pix *= M;

    gl_FragColor = vec4(0.);
    if(pix.x>res.x || pix.y>res.y) return;
}

```

```

// lens coord
vec2 l = floor(0.5+L2*(pix-center)/diameter);

vec4 col = vec4(0.);
// scale the lenslet image

for(int x=-N; x<=N;++x)
    for(int y=-N; y<=N;++y)
        if(x+y>=-N && x+y<=N) // keep only the N-nearest hex neighbors
            sample(col,pix,l,x,y);

gl_FragColor = col/col.a;
}

</shader>

</shadertoy>

```