

# Etude et modélisation de la formation de l'image d'un objet 3D translucide

N. Dey<sup>†</sup>, A. Boucher<sup>†</sup>, M. Thonnat<sup>†</sup> and J.-D. Sylvain<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> : I.N.R.I.A., Projet ORION, BP 93, 06902 Sophia Antipolis  
<sup>‡</sup> : C.N.R.S., LTE Université de Nice, 06108 Nice

**Résumé:** *Nous nous intéressons à des objets microscopiques, tridimensionnels, et translucides. Ils sont soumis à un éclairage visible incohérent pour être observés avec un microscope optique. Nous proposons un modèle complet de formation de l'image. Nous avons modélisé le processus global de formation de l'image comme étant composé de plusieurs étapes et d'espaces abstraits. L'objet existe dans l'espace objet physique (3D) et il est modélisé à travers son indice complexe de réfraction. Ensuite, nous simulons la phase de propagation de la lumière avec un moteur de lancer de rayons qui utilise les lois de l'optique géométrique. En tout point de l'espace, nous enregistrons les valeurs des intensités pour chaque rayon afin de former l'espace objet éclairé (3D). Nous simulons finalement le microscope par sa Fonction de Transfert : en appliquant cette fonction de transfert en tout point de l'espace éclairé, nous obtenons une image dans l'espace image (2D). Ces objets sont épais devant la profondeur de champ du microscope et un phénomène de flou apparaît. Ce flou qui est déjà gênant dans le cas d'objets opaques, perturbe grandement l'observation d'un objet translucide : les zones floues de l'objet sont visibles au travers de la zone focalisée. Afin de valider le modèle proposé, nous étudions des objets 3D translucides simples comme des billes de verre. Nous comparons les résultats du modèle numérique avec des données réelles afin de mieux comprendre le processus de formation de l'image dans son ensemble.*

## 1 Introduction

Cet article<sup>1</sup> est un résumé de notre thèse [5]. Nous y présentons un modèle de formation de l'image, appliqué à des objets 3D translucides. Lorsque l'on travaille avec des objets microscopiques, la profondeur de champ se trouve réduite et le flou devient prédominant. La plupart des objets de la scène que l'on observe sont pour la plupart complètement flous (voire invisibles sur l'image), ou seulement en partie flous. Dans le cas d'un ob-

jet translucide, la réfraction intervient. Un objet translucide qui est traversé par de la lumière provoque la réfraction de celle-ci, c'est-à-dire une déviation des rayons lumineux. Cela crée des zones de forte intensité et des zones de plus faible intensité, compliquant un peu plus l'image. De plus, le problème devient plus ardu par l'action du flou : les zones floues de l'objet peuvent être vu à travers l'objet, et l'image est encore plus dégradée par le flou. Supposons qu'un opérateur humain essaie maintenant de comprendre une telle image ; il est presque certain qu'avec de l'expérience, il y arrivera. Mais le problème est beaucoup plus compliqué si c'est un programme informatique qui doit analyser l'image et reconnaître le ou les objets de la scène. A notre connaissance, les travaux les plus proches qui existent couvrent les cas d'objets 3D microscopiques opaques [12] ou bien fluorescents [1]. Il n'existe pas de modèle d'objet translucide dans le cas général. A partir d'une théorie adaptée, et d'hypothèses précises, nous proposons un modèle de formation de l'image qui s'applique à des objets microscopiques translucides, aussi bien qu'à des objets microscopiques opaques. Nous avons choisi une modélisation en 3 étapes. La première étape est une étape de modélisation de l'objet translucide. La seconde est une phase de simulation de la propagation de la lumière à travers la scène et l'objet, qui permet de simuler la réfraction. La dernière phase s'occupe de simuler le flou. Avec ce modèle, nous pouvons modéliser des objets, et simuler des séquences d'images pour les comparer à des images réelles. Dans la partie 2, nous présentons les travaux les plus importants qui aient un rapport avec le présent sujet. La partie 3 introduit notre contribution puisqu'elle décrit en détails le modèle de formation de l'image que nous proposons. Nous utilisons ce modèle pour créer des séquences d'images dans la partie 4, et nous concluons dans la partie 5.

## 2 Etat de l'art

Nous allons étudier plus en détails les modèles de flou utilisés lorsque les phénomènes ondulatoires dominent, en prenant le cas d'un microscope optique. De nombreux travaux traitent de la modélisation de la PSF ou de l'OTF de microscopes ([9] [14] [6]) car c'est un des systèmes optiques les plus utilisés.

**Pour modéliser l'OTF d'un microscope** Hopkins [9] propose une méthode analytique qui conduit à l'expression de

1. Nous tenons à remercier la région Provence - Alpes - Côte d'Azur ainsi que les sociétés ACRI S.A. et Zambon Group SpA pour leurs soutiens financiers.

l'OTF d'un instrument à pupille circulaire. Son modèle tient compte de la défocalisation du système, et il l'applique à un microscope optique. En partant des définitions de l'OTF d'une pupille circulaire, il propose l'expression de l'OTF défocalisée d'un instrument d'optique éclairé en lumière incohérente. Stokseth [14] améliore le modèle d'OTF de Hopkins, en montrant que celui-ci n'est pas symétrique selon la défocalisation, contrairement à ce qu'Hopkins avait avancé. La fonction analytique est symétrique en  $z$ , mais pas en  $\varepsilon$  qui est la défocalisation (non symétrique en  $z$ , elle). Il en déduit une approximation avec des coefficients empiriques très précise, quelle que soit la défocalisation (Eq. 1) :

$$H_s(\rho, \varepsilon) = (1 - 0.69s + 0.0076s^2 + 0.43s^3) \dots \times Jinc \left[ 4k w(\varepsilon) \left( 1 - \frac{s}{2} \right) \frac{s}{2} \right] \quad (1)$$

où  $Jinc(x) = 2 \frac{J_1(x)}{x}$  ( $J_1$  est une fonction de Bessel) et  $s$  est une fréquence spatiale réduite (voir [14] pour plus de détails). Il note (Eq. 2) :

$$w(\varepsilon) = -d_f - \varepsilon \cos(\alpha) + \sqrt{d_f^2 + 2d_f\varepsilon + \varepsilon^2 \cos^2(\alpha)} \quad (2)$$

l'expression  $\cos(\alpha) = \sqrt{1 - \frac{ON^2}{n_0^2}}$  étant tirée de la définition de l'ouverture numérique. Evidemment,  $n_0$  est l'indice du milieu entre la lame microscopique et l'objectif du microscope,  $ON$  l'ouverture numérique du microscope et  $\lambda$  la longueur d'onde du rayonnement utilisé. La fonction  $w(\varepsilon)$  est particulière : elle mesure la distance maximale entre un front d'onde focalisé et un front d'onde défocalisé de  $\varepsilon$ .

**En vision par ordinateur** Nayar *et al.* proposent dans [12] une méthode de *Shape from Focus* appliquée à des objets opaques microscopiques. Leur but est de repérer puis d'isoler la zone la plus nette d'une image, de stocker cette zone, et d'incrémenter le focus pour recommencer l'opération. Cela les conduit à la reconstruction de la partie visible de l'objet. Dans [13], Schechner *et al.* s'intéressent à des objets translucides. Ce n'est pas de la même façon que nous, car il s'agit d'objets macroscopiques ; leur travail s'intéresse exclusivement à repérer des objets translucides ou transparents grâce aux reflets à la surface du milieu [13]. En effet, lorsque de la lumière passe à travers un milieu transparent ou translucide, il y a toujours (même pour un éclairage sous incidence normale) une partie de la lumière qui est réfléchi. Une fois repérés, ces reflets sont traités pour que l'on puisse retrouver l'image réfléchi, qui est de très faible intensité.

**En microscopie à fluorescence** le microscope fluorescent est considéré comme un système linéaire [1] [8]. Soit  $h(x, y, z)$  est la réponse impulsionnelle du microscope, et que  $o(x, y, z)$  est la répartition d'intensité 3D de l'objet, une image  $I|_{z_0}(x, y)$  est modélisée comme sur l'Eq. 3 :

$$I|_{z_0}(x, y) = \int o(x, y, z) * h(x, y, z - z_0) dz \quad (3)$$

De plus, cette description permet une analyse plus aisée de la formation de l'image dans le domaine fréquentiel (après transformation de Fourier) [7].

**La synthèse d'image** s'intéresse surtout à des scènes (donc des objets) macroscopiques, plus rarement microscopique. Il faut se tourner vers les travaux de Kagalwala *et al.* [11] pour y voir une application microscopique : ils simulent les effets d'un microscope à contraste d'interférences sur des spécimens transparents. Leur modèle est assez proche de la physique car il décrit les rayons lumineux de façon plus précise. Un rayon lumineux est ainsi composé d'un vecteur champ électrique  $\vec{E}$  et d'un vecteur champ magnétique  $\vec{B}$ . Cela leur permet de simuler les interférences de la lumière et aussi sa polarisation, c'est-à-dire des phénomènes plus «ondulatoires». Une technique de synthèse d'images qui se rapproche de beaucoup de nos travaux s'appelle le «*photon mapping*»[10]. Elle date de moins d'une dizaine d'années et qui fait partie de la tendance de la synthèse d'image réaliste (*i.e.* qui simule les phénomènes physiques le mieux possible). Par exemple, on peut reproduire rigoureusement une caustique. Le *photon mapping* est une méthode qui se compose essentiellement de deux passes : la première est la passe dite de «lancer de photons» ; elle va permettre de construire la *photon map* relative à la scène en suivant le trajet de photons. Les photons sont lancés de la source lumineuse vers la scène et ils se propagent un flux lumineux. En tout point de l'espace, le photon est propagé, réfracté ou réfléchi, et son intensité lumineuse est enregistrée dans la *photon map*. L'intensité totale de la scène n'est pas la somme de l'intensité de tous les points de la *map*, mais seulement l'intensité totale de la source lumineuse. La seconde est la phase de rendu qui utilise les informations de la *photon map* pour être plus performante. Pour cela, on utilise un moteur de lancer de rayons classique qui se sert de la *photon map* pour construire l'image finale. Les rayons sont lancés de l'observateur vers la scène ; avec un *ray tracer* sans *photon map*, le rayon est pris en compte si après ses réflexions/réfractions il rencontre une source lumineuse. Avec une *photon map*, le rayon est pris en compte si il frappe au final un point de la *photon map* qui n'est pas d'intensité nulle. Avec cette méthode, les caustiques sont très faciles à calculer et les effets de transparence sont aussi très bien simulés avec le *photon mapping* [10]. A l'échelle macroscopique, les auteurs arrivent à simuler avec une très grande précision l'effet de transparence de surface d'une statue de marbre ou d'un verre de lait.

### 3 Le modèle

Nous allons présenter et expliquer le modèle global de formation de l'image que nous avons développé. Il s'agit d'un modèle de formation de l'image pour un objet 3D translucide [3] [4], observé en transmission avec un microscope optique. Nous nous sommes intéressés à créer un modèle complet de la formation de

l'image le plus proche possible de la réalité, mais restant toutefois utilisable en pratique. Nous avons aussi supposé que nous avons une seule source de lumière, un seul objet et un seul système d'acquisition des images. Nous proposons un modèle de formation de l'image sous les hypothèses physiques suivantes : la source lumineuse est incohérente, l'objet observé est 3D et translucide, et le système d'acquisition est composé d'un microscope et d'une caméra CCD. Le cas d'un objet translucide étant le plus difficile à traiter, le modèle ne se restreint pas aux conditions précédentes, mais peut être plus général (objet opaque, pas de microscope, ...). Ce modèle s'articule essentiellement autour de 3 modules qui représentent au mieux la réalité de la formation de l'image. Avant de pouvoir obtenir l'image d'un objet, il faut que plusieurs étapes soient vérifiées : il faut que cet objet existe, donc il nous faut un modèle d'objet ; il faut que cet objet soit éclairé par une source lumineuse, pour «voir» quelque chose, il est donc nécessaire de modéliser les interactions de la lumière avec l'objet ; enfin, il faut qu'un système optique (avec une OTF) soit présent, d'où une modélisation de l'OTF. Toutes ces étapes sont nécessaires et elles dépendent l'une de l'autre, et si l'on en supprime une seule, il n'y aura pas d'image.

**Les différents espaces de travail** que nous avons modélisés sont les 3 espaces abstraits distincts suivants :

*L'espace de l'objet physique* dans lequel l'objet existe grâce à des données physiques, sans lumière ; dans cet espace 3D, nous allons supposer que l'on a un objet (3D lui-aussi) qui «baigne» dans un milieu homogène (vide, air, etc...) ; ici, l'objet comme le milieu ambiant ont des existences physiques, c'est-à-dire qu'ils possèdent des propriétés physiques qui sont mesurables. Ce sont par exemple leur densité, leurs propriétés de réfraction de la lumière, etc...

*L'espace objet éclairé* qui est le résultat de l'éclairement de l'espace objet précédant par une source lumineuse ; l'espace objet physique est maintenant éclairé par une source lumineuse. La propagation de la lumière dans l'espace objet va donner lieu à des interactions lumière-matière. Des phénomènes comme de l'absorption, de la réfraction vont avoir lieu. L'espace objet éclairé est donc un espace toujours 3D, qui est défini comme une répartition tridimensionnelle d'intensité lumineuse.

*L'espace image* qui est l'espace dans lequel va se former l'image que l'on observe. En plaçant un système optique de manière à observer la scène créée par l'espace objet éclairé, on peut obtenir une image. Le système optique va projeter cet espace 3D sur l'espace image 2D. C'est à ce niveau, pendant cette phase projective que peut apparaître le flou. Il est intéressant de remarquer que la notion d'«observation» n'intervient que dans le troisième et dernier espace modélisé ; elle peut sembler apparaître dans l'espace objet éclairé, mais ce n'est pas le cas, c'est seulement un abus de langage. Les espaces objets sont 3D, tandis que l'espace image est 2D. Ce que nous essayons de démontrer, c'est que le fait d'éclairer dégrade déjà la réalité (autrement dit l'espace objet physique), et que l'observation de l'espace objet

éclairé conduit à une dégradation encore plus importante de la réalité (projection). L'information 3D relative à l'objet va donner naissance au phénomène du flou. Dans certains cas, il est possible de se servir de ce flou pour remonter à une partie de l'information 3D en prenant le chemin inverse (déconvolution), mais nous perdons tout de même beaucoup d'information. L'éclairage peut faire apparaître des artefacts optiques, mais l'observation réalise une projection 3D vers 2D qui fait apparaître du flou.

**La modélisation des objets** est la première étape du modèle. Afin d'avoir un modèle théorique d'objet, il est nécessaire de définir plusieurs grandeurs physiques qui sont utiles pour définir l'objet, sa taille, sa forme, ses propriétés... Nous le décrivons de manière analytique : en tout point  $(x, y, z)$ , il est possible de définir un indice complexe de réfraction (décrivant l'absorption et l'indice de réfraction de ce point). A tout point de l'espace des réels à 3 dimensions  $\mathbb{R}^3$  correspond une unique valeur dans l'espace des complexes  $\mathbb{C}$ . L'indice complexe de réfraction se note  $\hat{n} = n + i.\kappa$ , la partie réelle décrivant la réfraction et la partie imaginaire décrivant l'absorption.

**Les interaction lumière matière** régissent la création de l'espace objet éclairé. Nous avons choisi de modéliser un éclairage monochromatique. En général, nous gardons une longueur d'onde moyenne de  $\lambda = 0.6 \mu m$ . Nous nous sommes cantonnés à ce type de lumière pour notre modèle, mais nous avons laissé  $\lambda$  comme paramètre, de façon à pouvoir facilement le changer. Il est assez facile de généraliser le modèle à une source de lumière blanche. Plaçons-nous loin de la conception du modèle pour étudier si cette hypothèse est forte. La polychromaticité de la lumière n'intervient pas de façon notable si l'on fait abstraction de la dispersion de la lumière blanche lors de sa rencontre de la matière (soit l'objet observé soit le système optique). Si on fait abstraction de la dispersion de la lumière blanche et que l'on compte sur la correction de l'objectif du système optique, on peut supposer que l'on éclaire en lumière monochromatique. Dans le cas d'un microscope, l'objectif est corrigé de façon à ce qu'il n'y ait pas de dispersion chromatique dans les lentilles. Nous travaillons avec des objets suffisamment gros devant la longueur d'onde pour pouvoir faire l'hypothèse qu'il n'y a pas de diffraction. La diffusion est un phénomène important [15] que nous n'avons pas inclus de manière rigoureuse dans notre modèle. La lumière diffusée n'atteindra jamais l'observateur. Nous allons donc supposer que tout se passe comme si cette énergie était «absorbée». Ce coefficient d'absorption équivalent, que nous allons noter  $\xi$ , a été estimé à  $0.007 \mu m^{-1}$  pour une sphère microscopique d'une vingtaine de microns.

**Le modèle de flou** que nous avons retenu est le modèle d'OTF 3D de Stokseth (voir la partie 2). A cause de la profondeur de champ finie d'un système optique réel, chaque partie de l'objet non focalisée est floue. Tout système optique introduit des effets de flou car il a une ouverture finie qui implique

une profondeur de champ finie. Si on ne considère un objet 2D, défini par un seul plan 2D  $o(x, y)$ , positionné en  $z_1$  et défocalisé d'une distance  $\varepsilon = z_1 - z_0$ , son image est le résultat de sa convolution par la PSF du système défocalisée  $h$  (Eq. 4) :

$$i(x, y)|_{z_1/z_0} = o(x, y, z_1) * h(x, y, z_1 - z_0) \quad (4)$$

Nous appellerons imagette le résultat, indépendant des autres, de la convolution d'un plan image indicé  $z$  avec un la PSF 2D défocalisée correspondante. Si on généralise à tout l'espace (objet 3D), chaque partie de cet objet va contribuer à la formation de l'image. L'image finale  $I(x, y)|_{z_0}$  est donc l'addition des imagettes, correspondant à chaque plan objet lumineux de l'espace objet éclairé. Pour obtenir un modèle exploitable en pratique, nous proposons une formule discrète (Eq. 5) :

$$I(x, y)|_{z_0} = \sum_{z_n \in \text{espace objet}} o(x, y, z_n) * h(x, y, \varepsilon) \quad (5)$$

où la convolution est, elle aussi, discrète. Pour calculer une image, on applique le modèle de flou 3D à chaque plan-objet, le focus définissant la valeur  $\varepsilon = 0$ . Alors, chaque plan objet est convolué avec le masque 2D de la PSF qui lui est propre, pour former une imagette. La PSF  $h$  est une fonction 3D qui dépend de la défocalisation  $\varepsilon$  comme nous l'avons vu plus tôt : rappelons que cette PSF est en fait la TF du modèle d'OTF de Stokseth. Plus  $\varepsilon$  est grand et plus le flou est important. Nous proposons donc comme modèle l'algorithme de l'Eq. 5. Pour plus de détails concernant cet algorithme, se reporter à [3] [5].

## 4 Les résultats

Nous allons maintenant valider le modèle avec les objets 3D translucides. Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus avec notre modèle avec des objets simples (microbille de verre) et plus complexe (pollen de graminées).

**Les microbilles de verre** sont les premiers objets qui nous intéressent. Simples à modéliser, d'indice connu, elles sont la première étape pour valider le modèle. Nous représentons les résultats obtenus avec une microbille (d'indice  $n_v = 1.52$ ) à l'air libre (indice  $n_0 = 1.0003$ ) de  $(63 \pm 2)\mu\text{m}$  de diamètre. Nous avons donc simulé cette bille translucide par une sphère de  $(63 \pm 2)\mu\text{m}$  de diamètre, d'indice 1.52 et de diffusion équivalente à une absorption de  $0.007 \mu\text{m}^{-1}$ . Sur la Fig. 1, nous avons représenté l'espace objet calculé, et les espaces images réel et calculés. Sur les images calculées (Fig. 1 (a)), la caustique qui apparaît (voir la coupe XZ) est plus localisée et moins étalée que dans la réalité (Fig. 1 (b)). En effet, une bille réelle est loin d'être parfaite, contrairement à la sphère du modèle ; une surface non sphérique rigoureusement entraînera un étalement de la caustique. Le point le plus lumineux de la caustique (point focal) correspond bien au point focal réel. Nous pouvons remarquer un effet de diffraction sur la coupe centrale de la séquence réelle : il

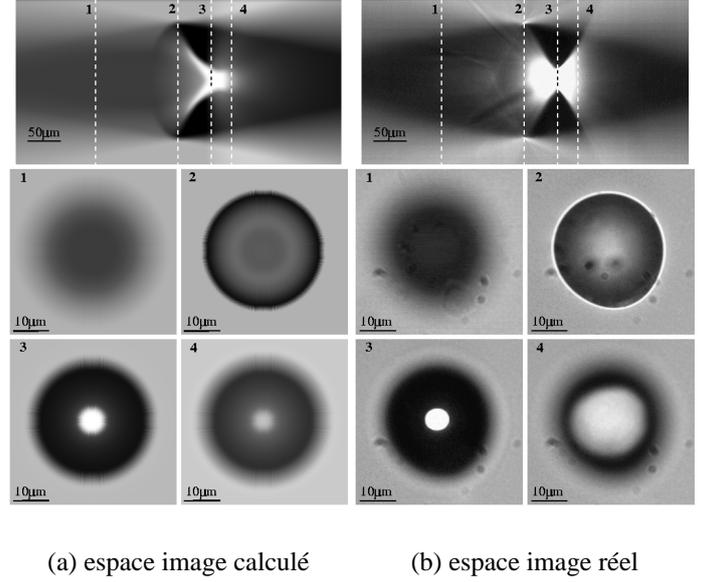


FIG. 1 – Les résultats pour une bille de verre de diamètre  $(63 \pm 2)\mu\text{m}$ , dans l'air. (a) espace image calculé et (b) espace image réel. Dans (a) et (b), l'image du haut est une coupe latérale (XZ), et les images en-dessous numérotées de 1 à 4 sont des coupes transversales (XY) ; elles correspondent aux pointillés verticaux de la coupe XZ. Nous pouvons remarquer sur l'image 2 (b) que la bille n'a pas une section circulaire.

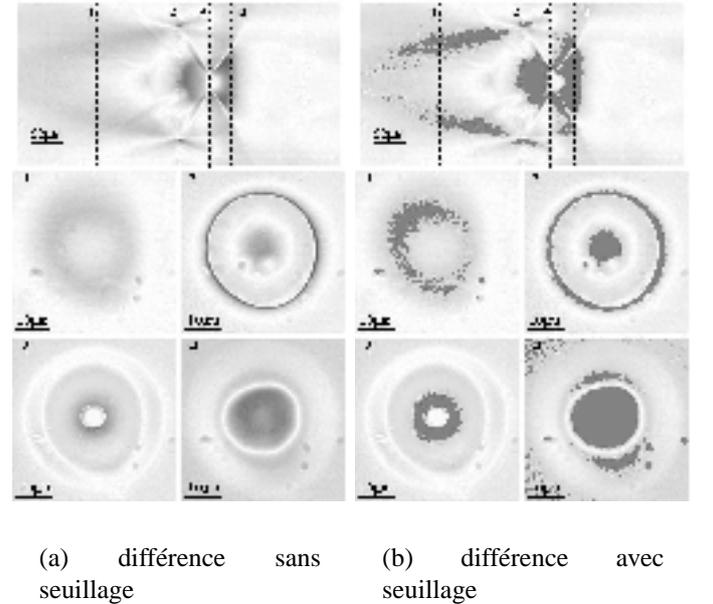


FIG. 2 – Images résultantes de différences image à image entre l'espace image réel et avec l'espace image calculé ((a) et (c)). Les erreurs s'échelonnent de 0 (blanc) à 255 (noir). La figure (b) se différencie de la (a) par un seuillage à 50, qui couvre 81.7% du maximum d'erreur. Cela met en évidence le fait que l'erreur est très localisée.

y a un anneau brillant autour de la bille, qui n'apparaît évidemment pas sur l'image calculée, faute de modélisation. La Fig. 2 représente la carte des différences des niveaux de gris des images réelles et calculées. Les écarts les plus importants se situent bien là où nous les attendions : aux endroits où les effets de la diffraction se font sentir, et aux endroits où la caustique fait défaut aux images calculées. Sur la Fig. 2 (b), nous avons seuillé les erreurs à 50 niveaux de gris sur 255 pour faire ressortir les zones dans lesquelles les écarts sont les plus importants. Sur les Fig. 2 (a) et (b), on peut voir que les images réelles correspondent assez bien aux résultats de l'espace objet éclairé. L'extérieur de l'objet est identique au bruit de fond près, et la diffraction (images (a) 2 et (b) 2) est la plus forte erreur. La plupart des images ont une erreur maximale moindre dans l'espace image modélisée que dans l'espace objet éclairé : dans notre modèle, l'étape de création de l'espace image (système optique) diminue l'écart par rapport à des images réelles. Nous allons maintenant appliquer le modèle complet sur un modèle de pollen de graminée, identique au précédant. Nous allons en plus simuler la réfraction dans l'objet, en plus de l'absorption.

**Pour de objets complexes** comme des grains de pollen, la détermination de l'indice de réfraction est plus compliquée. Pour des spécimens biologiques contenant de l'eau, on peut [16] prendre un indice de réfraction de l'ordre de 1.33. Un pollen est une cellule, qui répond donc à cette définition. Plus précisément, dans [2], on trouve que l'indice de réfraction d'une exine (carapace) de pollen varie entre 1.55 et 1.60. En ce qui concerne la glycérine, son indice (de 1.47) est supérieur ou de l'ordre à celui de la fuchsine (le solvant), toujours d'après [2]. Nous avons reproduit un pollen de *Poaceae*, mais sans inclure de taches sombres au centre comme sur les images réelles (voir la Fig. 3 colonne de droite). Le modèle d'objet est donc composé de 2 sphères non concentriques. Le pore est représenté à l'aide de 2 sphères lui aussi. L'intérieur du pollen (le cytoplasme) est peu absorbant tandis que la croûte externe du pollen (l'exine) l'est plus. A l'aide de ces données, nous avons simulé le trajet de la lumière dans le pollen (espace objet éclairé) avant d'appliquer le modèle de flou. Les résultats se trouvent sur la Fig. 3 ; la colonne de gauche donne les résultats obtenus avec le modèle prenant en compte la réfraction, et la colonne de droite présente l'objet de référence. Par rapport à [3], nous avons résolu le problème de forte diminution de la taille du pollen sur les image (a) et (e) et nous conservons une taille moyenne approximativement constante quelle que soit l'image de la séquence. L'image centrale (c) est la plus nette de la séquence ; on voit apparaître le pore (qui apparaît sous la forme d'une tache sombre sur le bord en bas à gauche) sur presque toutes les images, comme sur les images réelles (f) à (j). Sur les images (d) et (e), la réfraction apparaît comme sur les images (i) et (j) : c'est une zone plus claire qui encercle le cytoplasme du pollen. Sur les images (d) et (e), l'effet de la réfraction est beaucoup plus intense que sur les images (i) et (j) ; ceci est toujours dû au fait que nous tra-

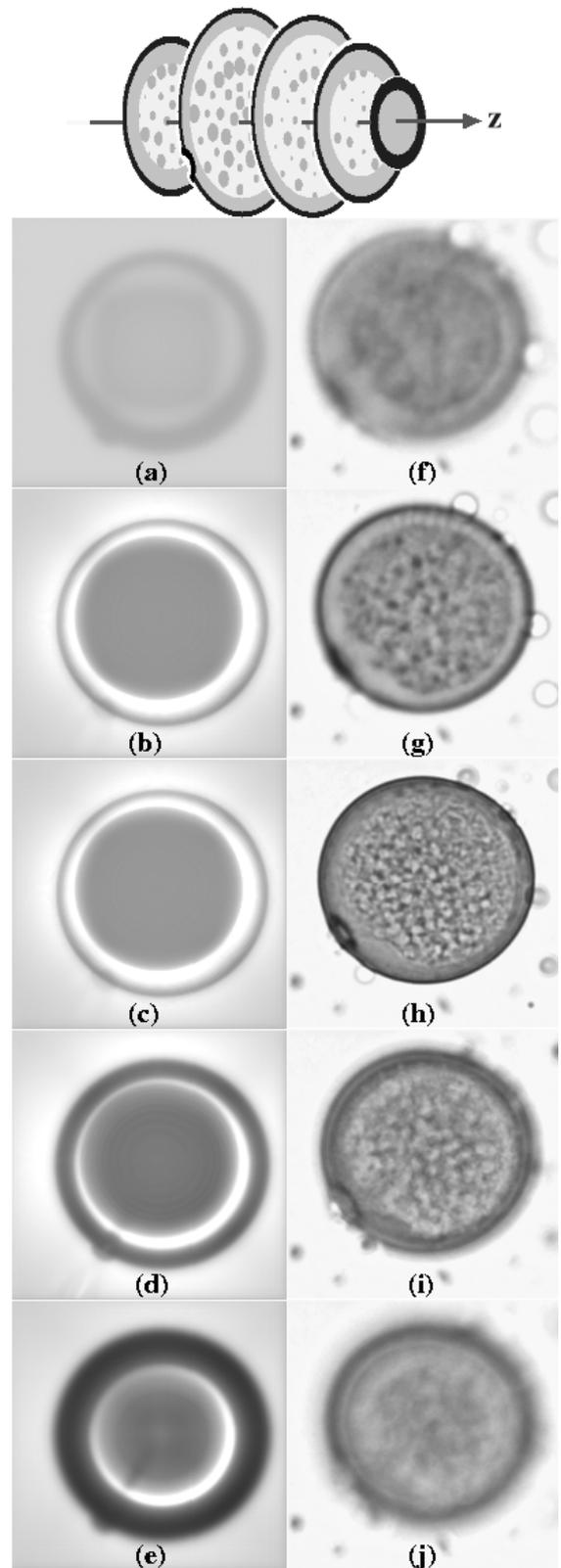


FIG. 3 – Les résultats pour le pollen de graminée dans la fuchsine. Son diamètre est de  $22 \mu\text{m}$  : (a) espace image calculé avec le modèle prenant en compte la réfraction et (b) espace image réel de référence.

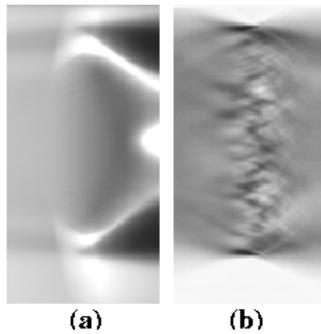


FIG. 4 – Résultats de la simulation d'un pollen de graminée vus selon des coupes latérales (XZ). Nous présentons les résultats obtenus pour une coupe XZ (a) de l'espace image calculé et (b) réelle (pollen de Poaceae).

vaillons avec des sphères parfaites, exemptes de granules en leur centre qui ont comme effet d'étaler la caustique. À l'extérieur des images du pollen modélisé, le fond est un peu plus grisé qu'en réalité, *i.e.* moins intense. Les résultats sur les coupes XZ sont représentés sur la Fig. 4. Nous comparons les résultats du modèle complet (avec réfraction, figure (b) au centre) aux résultats du modèle ne prenant pas en compte la réfraction (figure (a)) et aux images réelles (figure (c)). Sur les images calculées, nous retrouvons une localisation difficile du grain de pollen, des zones sombres aux extrémités du pollen (en haut et en bas sur les images de la Fig. 4), et des cônes d'ombre de part et d'autre ; le cône de gauche a disparu ; sur la droite de la figure (b), nous retrouvons la croix lumineuse qui est due à la réfraction. La pente est la même sur l'image XZ réelle ( $(0.57 \pm 0.20)$  en échelle absolue) que sur l'image XZ calculée ( $(0.62 \pm 0.22)$  en échelle absolue), mais la caustique présente sur la figure (b) est beaucoup plus intense.

## 5 Conclusion

Nous avons présenté un modèle de formation de l'image, adapté pour des objets 3D translucides. Par rapport à [3], l'introduction du modèle prenant en compte la réfraction améliore de beaucoup les résultats. Sur des objets simples (microbilles de verre), le modèle donne de très bons résultats, à la diffraction près (qui n'a pas été modélisée). Pour un objet complexe comme un grain de pollen, les résultats sont meilleurs car la diffraction est moins visible du fait de la complexité de l'objet. Grâce à ce modèle qui inclut la réfraction, nous simulons relativement bien les caustiques. Pour l'instant, les objets modélisés sont créés à partir de formes géométriques (sphères), et nous pensons développer ou adapter prochainement des interfaces pour créer des objets quelconques, qui puissent être compatibles avec notre modèle.

## Références

- [1] D.A. Agard et J.W. Sedat. Three-dimensional architecture of a polytene nucleus. *Nature*, 302:676–681, Avril 1983.
- [2] E.J. Cushing. Bumps or pits. *The Pollen Monitor*, Février 1997.
- [3] N. Dey, A. Boucher, et M. Thonnat. Modélisation et étude de la formation de l'image d'un objet 3d translucide. In *Actes du deuxième colloque francophone Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie*, volume 1, pages 75–80. SFO, Novembre 2001.
- [4] N. Dey, A. Boucher, et M. Thonnat. Image formation model of 3-d translucent object observed in light microscopy. In *Proceedings of ICIP'02*, Septembre 2002.
- [5] Nicolas Dey. *Etude de la Formation de l'Image d'un Objet Microscopique 3D Translucide - Application à la microscopie optique*. Thèse de Doctorat, Université de Nice - Sophia Antipolis, Décembre 2002.
- [6] S.F. Gibson et F. Lanni. Diffraction by a circular aperture as a model for three-dimensional optical microscopy. *Journal of Optical Society of America A*, 6(9):1357–1367, Septembre 1989.
- [7] J. W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. McGraw-Hill Book Company, 1968.
- [8] Y. Hiraoka, J.W. Sedat, et D.A. Agard. Determination of three-dimensional imaging properties of a light microscope system. *Biophys. J.*, 57:325–333, Février 1990.
- [9] H.H. Hopkins. The frequency response of a defocused optical system. *Proceedings of the Royal Society of London Serie A*, 231:91–103, Février 1955.
- [10] H.W. Jensen, S.R. Marschner, M. Levoy, et P. Hanrahan. *Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping*. A.K. Peters Ltd., 2001.
- [11] Farhana Kagalwala et Takeo Kanade. Computational model of image formation process in DIC microscopy. In *Proceedings of Three-Dimensional and Multidimensional Microscopy V*, volume 3261, pages 193–204, Bellingham, Washington, Janvier 1998. SPIE.
- [12] S.K. Nayar et Y. Nakagawa. Shape from focus. *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Int.*, 16(8):824–831, Août 1994.
- [13] Yoav Y. Schechner, Nahum Kiryati, et Ronen Basri. Separation of transparent layers using focus. *IJCV*, 39(1):25–39, 2000.
- [14] P.A. Stokseth. Properties of a defocused optical system. *Journal of Optical Society of America*, 59(10):1314–1321, Octobre 1969.
- [15] H.C. van de Hulst. *Light Scattering by Small Particles*. Dover Publications, inc., 2nd édition, 1981.
- [16] S.H. Wiersma. *Focusing of Electromagnetic Waves*. Thèse de Doctorat, Vrije Universiteit te Amsterdam, Septembre 2000.