

Filtre SinSquare pour l'optimisation du multiplexage temporel de super résolution

Marie Florence YEBOUET^{1*}, Sylvère DION¹, Kossan Olivier BAGUI¹,
Assoumou Saint Doria YAMOA¹, Akyana BRITWUM² et Jérémie ZOUEU¹

¹ Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny, Unité Mixte de Recherche en Science et Technique de l'Ingénieur, Laboratoire Instrumentation Image et Spectroscopie, BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

² Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Department of Physics, P. O. Box Up 1279, KNUST, Kumasi, Ghana

(Reçu le 21 Novembre 2024 ; Accepté le 24 Février 2025)

* Correspondance, courriel : akissi.yebouet@inphb.ci

Résumé

Le multiplexage temporel de super-résolution (MTR) est fréquemment utilisé pour dépasser la limite de diffraction en imagerie optique. Dans ce travail, nous avons contribué à l'optimisation de la technique conventionnelle de multiplexage temporel de super-résolution en développant un filtre SinSquare pour le codage et le décodage des images. Le filtre mis en place est projeté sur l'échantillon et déplacé latéralement par incréments de 200 μm à l'aide d'un modulateur spatial de lumière, permettant ainsi l'encodage des hautes fréquences de l'image. Treize images de basse résolution sont enregistrées durant cette première étape, puis un traitement numérique est appliqué à ces images, aboutissant à la reconstruction d'une image de haute résolution. Le filtre SinSquare a été testé sur deux types d'échantillons à savoir, deux échantillons synthétiques, via une simulation numérique et un spécimen végétal (un grain de pollen), étudié par des méthodes expérimentales. Les résultats montrent que les images reconstruites avec le filtre SinSquare présentent une meilleure résolution que celles obtenues avec le filtre sinusoïdal couramment utilisé pour améliorer la qualité des images. Les paramètres d'évaluation de la qualité d'image, tels que le pic du rapport signal sur bruit (PSNR : Peak Signal-to-Noise Ratio), l'erreur quadratique moyenne (MSE : Mean Square Error) et la racine carrée de l'erreur quadratique (RMSE : Root Mean Square Error), mettent en évidence un gain de résolution significatif de ce filtre comparé au filtre sinusoïdal. Ces résultats démontrent la capacité du filtre SinSquare à réduire les effets de moiré et à mieux réguler l'équilibre entre flou et netteté en comparaison avec le filtre sinusoïdal.

Mots-clés : *multiplexage temporel, Super-résolution, filtre SinSquare, imagerie optique.*

Abstract

SinSquare Filter for the Optimization of Temporal Super-Resolution Multiplexing

Temporal Super-Resolution Multiplexing (TSRM) is frequently used to overcome the diffraction limit in optical imaging. In this work, we contributed to the optimization of the conventional temporal super-resolution multiplexing technique by developing a SinSquare filter for image encoding and decoding. The designed filter is projected onto the sample and shifted laterally in 200 μm increments using a spatial light modulator, enabling the encoding of high frequencies in the image. Thirteen low-resolution images are recorded during

this initial step, followed by digital processing, leading to the reconstruction of a high-resolution image. The SinSquare filter was tested on two types of samples, two synthetic samples, through numerical simulation and a plant specimen (a pollen grain), studied using experimental methods. The results show that images reconstructed with the SinSquare filter achieve higher resolution compared to those obtained with the sinusoidal filter, which is commonly used to enhance image quality. Image quality evaluation parameters, such as the Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), Mean Square Error (MSE), and Root Mean Square Error (RMSE), highlight a significant resolution improvement of this filter compared to the sinusoidal filter. These findings demonstrate the SinSquare filter's ability to reduce moiré effects and better regulate the balance between blur and sharpness compared to the sinusoidal filter.

Keywords : *super-resolution, SinSquare filter, time multiplexing, image processing.*

1. Introduction

Ces dernières années, les techniques de super-résolution ont connu un regain d'intérêt dans le domaine de l'imagerie optique [1]. La super-résolution fait référence aux méthodes permettant d'améliorer la résolution de l'image au-delà de la limite de diffraction. En microscopie optique, la résolution spatiale des microscopes est principalement limitée par la diffraction. La limite de diffraction définit une gamme finie de fréquences spatiales pouvant être transmises à travers un microscope [2]. Le microscope se comporte alors comme un filtre passe-bas, et l'image observée est une représentation partielle de la scène réelle. Dans les microscopes classiques, la limite de résolution fondamentale, c'est-à-dire la plus petite distance en dessous de laquelle deux points voisins ne peuvent être distingués séparément, est souvent associée à la diffraction [3]. En effet, la diffraction est un phénomène physique qui se produit lorsque l'onde émise rencontre un obstacle ou une ouverture de taille comparable ou inférieure à celle de la longueur d'onde utilisée. La diffraction est la principale cause de dégradation de toute image microscopique. Elle limite le pouvoir de séparation du microscope, empêchant ainsi l'observation de détails fins dans l'image. Le problème que nous souhaitons résoudre est de retrouver les détails réels de l'objet, qui ont été supprimés par le système optique. Cela suscite un intérêt majeur pour l'amélioration de la résolution des microscopes optiques. Le multiplexage temporel de super-résolution (MTSR) est devenu une approche courante pour surmonter les limitations de la diffraction [4]. Initialement développé en une dimension (1D) [5], le MTSR a été étendu à deux dimensions (2D) [6, 7]. Le principe de base utilise deux filtres, l'un attaché à l'objet pour encoder l'information spatiale, et la faire passer à travers l'objectif de microscope et l'autre lié à l'image pour le décodage. Durant le processus, les deux filtres sont déplacés simultanément en sens latéral opposé, plusieurs images de l'objet sont prises pour différentes positions du filtre. Ces images sont ensuite toutes additionnées pour extraire les informations super-résolues puis une reconstruction est générée suivie du décodage et finalement une image super-résolue est obtenue [8]. Les informations spatiales peuvent être multiplexées dans divers domaines, notamment le temps [9, 10], la polarisation [11, 12], la longueur d'onde [13, 14] et les dimensions spatiales [15, 16]. Notre approche utilise des filtres de codage et de décodage pour récupérer les hautes fréquences spatiales généralement perdues lors de l'utilisation de systèmes de microscopie standard. L'élément de codage redirige ces composantes spectrales vers l'ouverture du système optique. Cependant, la nature et les propriétés du filtre jouent un rôle primordial dans le processus de reconstruction [17]. Le processus de codage et la récupération des hautes fréquences encodées ont été simplifiés en adoptant des techniques numériques au lieu de filtres physiques [18 - 20]. Dans ce travail, nous utilisons le décodage numérique et mettons en œuvre un filtre de codage projeté. L'objectif général est de contribuer à l'amélioration de la résolution des images microscopiques. Il s'agit spécifiquement de : (i) mettre à disposition le filtre SinSquare pour optimiser la technique du MTSR, (ii) l'appliquer à deux types d'échantillons à travers une simulation numérique et une expérimentation, (iii) tester l'efficacité du filtre en comparant les images reconstruites à partir de celui-ci à celles obtenues à l'aide de filtre existant.

2. Matériel et méthodes

2-1. Matériel

2-1-1. Dispositif expérimental

Le microscope de multiplexage temporel développé est illustré dans la **(Figure 1)**.

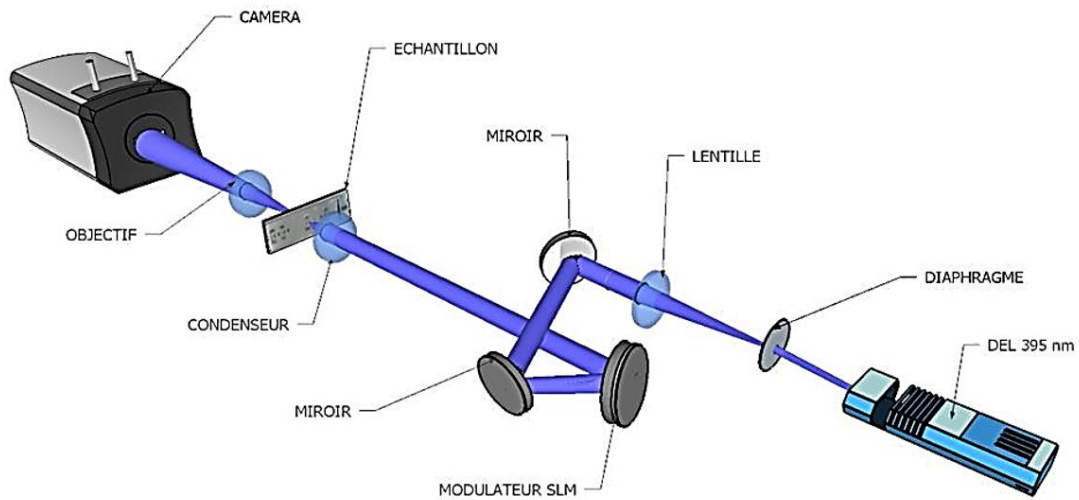


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental du multiplexage temporel

Il est composé de :

- Une source lumineuse, une diode électroluminescente (DEL) de longueur d'onde 395 nm d'Océan Optics. La diode électroluminescente a une puissance de 0,550 mW. Le faisceau émanant de la source est couplé dans une fibre optique, et à la sortie de celle-ci, la puissance disponible pour éclairer le spécimen est de 0,004 mW. Le choix de cette longueur d'onde nous place à la limite de la résolution atteignable ;
- Un diaphragme de diamètre 2,5 cm, permettant de restreindre ou d'augmenter la quantité de lumière émise, et aussi de réaliser un filtrage spatial de la lumière ;
- Une lentille convergente de Thorlabs, de distance focale de 3 cm, servant à collimater le faisceau lumineux ;
- Deux miroirs plans de Thorlabs, de diamètre 2,5 cm, guidant la lumière vers l'échantillon.
- Un modulateur spatial de lumière (SLM pour Spatial Light Modulator) qui sert à projeter le filtre sur l'échantillon ;
- Un condensenseur de type Zeiss, aidant à focaliser la lumière sur l'échantillon ;
- Un objectif de type Zeiss, utilisé pour agrandir l'image de l'échantillon ;
- Une caméra sCMOS (Andor Zyla 5.5 sCMOS camera) avec une taille de pixels de 6,5 μm x 6,5 μm , utilisée pour la prise d'images.

2-1-2. Filtre SinSquare

Le filtre SinSquare a été construit à partir d'une modulation sinusoïdale multipliée par une fonction quadratique. Il est présenté sur la **(Figure 2)**. L'expression analytique est donnée par **l'Équation 1**. On suppose φ identique dans chaque fonction.

$$F(r) = \frac{1}{2} (1 + \sin(2\pi pr + \varphi) \times (2\pi pr + \varphi)^2) \quad (1)$$

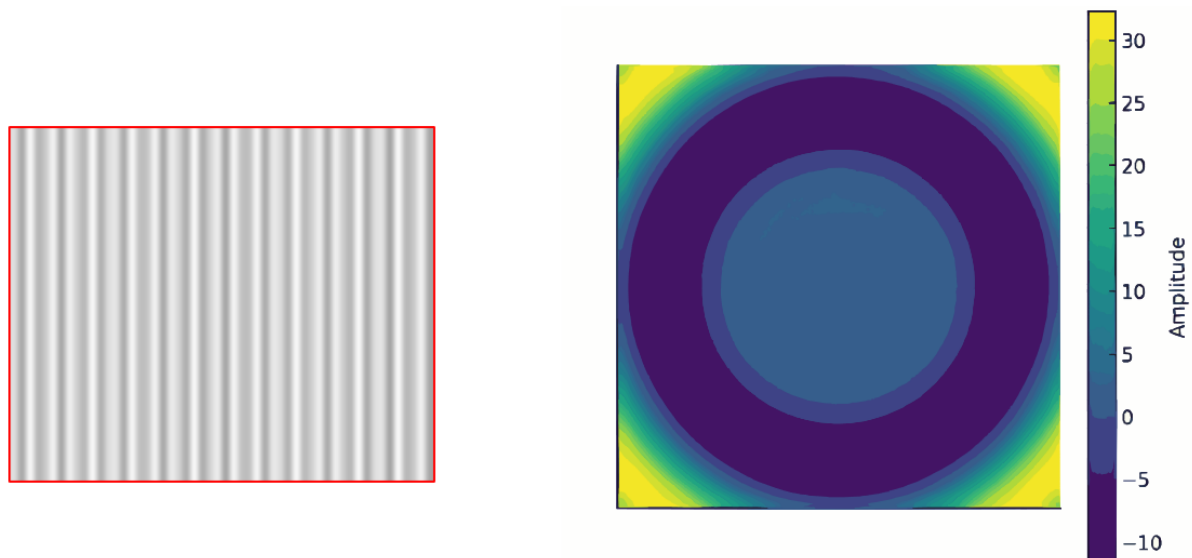


Figure 2 : *Filtre d'encodage résultant du produit d'une fonction sinusoïdale et d'une fonction carrée (Filtre Sinsquare)*

On observe la modulation sinusoïdale amplifiée par la composante quadratique, créant des variations radiales distinctes. Cela est bénéfique pour améliorer la détection de certaines structures en filtrage spatial, puisqu'il permet d'accentuer certaines fréquences. Si l'on considère une image définie par une fonction d'intensité $I(x, y)$, l'application du filtre spatial $F(r)$ peut être exprimée sous la forme d'une convolution.

$$I_f(x, y) = I(x, y) * F(r) \quad (2)$$

$r = \sqrt{x^2 + y^2}$ Représente la distance radiale au centre de l'image.

2-2. Méthode

2-2-1. Méthode avec les images de synthèses

La méthodologie expérimentale consiste, dans un premier temps, à récupérer des images standardisées couramment utilisées pour tester des algorithmes de filtrage numérique [21, 22] et [23 - 25], que nous considérons comme des images de haute résolution (HR). Ces images sont ensuite utilisées comme entrée du système optique que nous avons modélisé numériquement, conformément au dispositif expérimental décrit dans la partie "dispositif expérimental". Nous simulons ainsi le passage de l'image HR à travers le système et obtenons une image de basse résolution (LR), traduisant l'effet du système optique. Par la suite, les filtres sinusoïdaux et SinSquare sont appliqués indépendamment sur l'image HR, et le passage à travers le système optique est simulé afin de générer des images LR filtrées. Un décalage latéral sur l'image HR est simulé et, au total, treize images de basse résolution ont été enregistrées pour chaque filtre. Ensuite, les treize images LR filtrées sont utilisées pour une reconstruction numérique. Enfin, une comparaison est réalisée entre les images reconstruites obtenues avec les différents filtres et l'image HR d'origine. Pour cela, nous utilisons des métriques quantitatives (PSNR, MSE et RMSE) afin d'évaluer la qualité de l'image reconstruite et sa ressemblance avec l'image HR.

2-2-2. Méthode avec un spécimen végétal

Dans le cadre de cette application, nous avons utilisé des images réelles d'un spécimen végétal, en l'occurrence un grain de pollen, fixé sur une lamelle de silice de dimensions 75 mm x 25 mm, avec une hauteur de 1 mm, et ne présentant aucune impureté. Une image de référence du grain de pollen est obtenue à l'aide du système optique physique décrit dans la partie « dispositif expérimental », considéré comme une image de basse résolution (LR). Chaque filtre a été projeté et décalé latéralement sur l'échantillon par incréments de 200 μm à l'aide du modulateur spatial de lumière (SLM pour Spatial Light Modulator). Une image a été enregistrée à chaque position du filtre sur l'échantillon afin de produire au total treize images LR filtrées pour chaque filtre. Ces images sont ensuite utilisées pour une reconstruction numérique. Enfin, une comparaison est effectuée entre les images reconstruites pour chaque filtre et l'image acquise avec le système optique physique, en utilisant les mêmes métriques que celles de l'expérimentation avec les images de synthèse, afin d'évaluer la ressemblance et de valider la pertinence du filtrage appliqué [26].

3. Résultats et discussion

Les différents résultats obtenus sont présentés dans les (*Figures 3, 4 et 5*) illustrant les étapes du processus ainsi que l'impact des filtres appliqués. Ces figures permettent de comparer visuellement les images traitées afin d'évaluer la pertinence des méthodes utilisées.

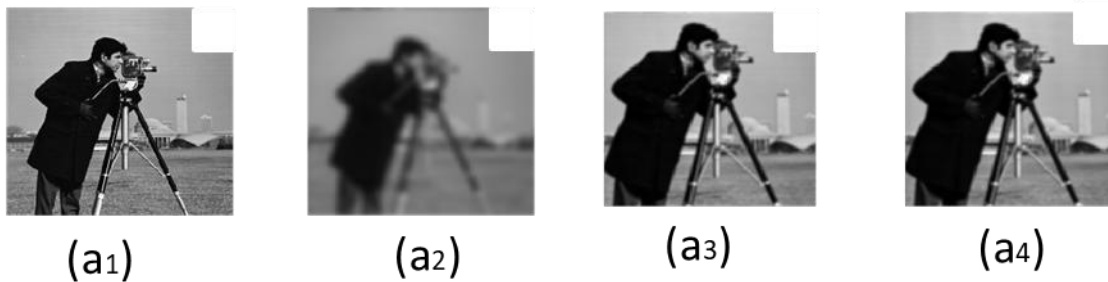


Figure 3 : *Images de synthèses (a1) de haute résolution, (a2) de basse résolution, (a3) reconstruite à l'aide du filtre Sinusoïdal et (a4) reconstruite à l'aide du filtre SinSquare*



Figure 4 : *Images de synthèses (B1) de haute résolution, (B2) de basse résolution, (B3) reconstruite à l'aide du filtre Sinusoidal et (B4) reconstruite à l'aide du filtre SinSquare*

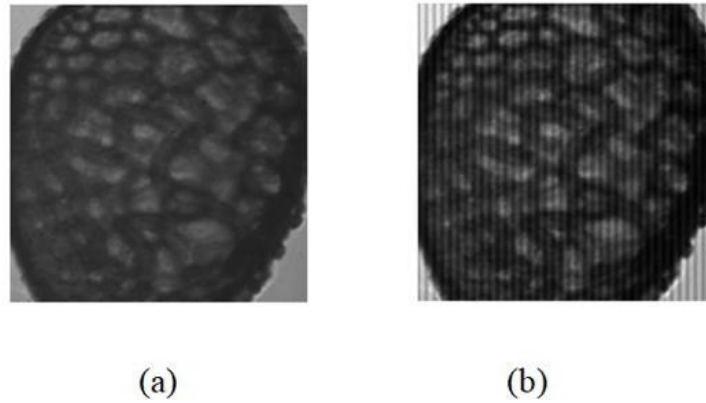


Figure 5 : Images expérimentales(a) de basse résolution, (b) reconstruite

Les performances du filtre proposé sont comparées à celles du filtre sinusoïdal à l'aide des métriques suivantes :

- L'erreur quadratique moyenne (MSE : Mean Square Error) pour évaluer l'erreur moyenne entre les pixels de l'image originale et ceux de l'image après application des filtres.
- Le pic du rapport signal sur bruit (PSNR : Peak Signal Noise Ratio) mesure la qualité de reconstruction de l'image en comparant le niveau de bruit introduit par le filtrage.
- La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE : Root Mean Square Error) pour évaluer plus intuitivement les distorsions dans l'image.

Les (**Tableaux 1, 2 et 3**) contiennent les valeurs des différents paramètres calculés pour les images reconstruites avec les filtres SinSquare et sinusoïdal. Il a été observé sur les deux images de référence que la valeur du PSNR du filtre SinSquare est significativement plus élevée que celle du filtre sinusoïdal, et que les paramètres MSE et RMSE sont également significativement inférieurs à ceux du filtre sinusoïdal.

Tableau 1 : Comparaison du PSNR, du MSE et du RMSE en dB des images reconstruites obtenues avec les filtres sinusoïdaux et SinSquare pour l'image du cameraman

Paramètres	Filtre Sinusoïdal	Filtre SinSquare
PSNR	56,2279	61,2137
MSE	0,1562	0,0495
RMSE	0,3952	0,2226

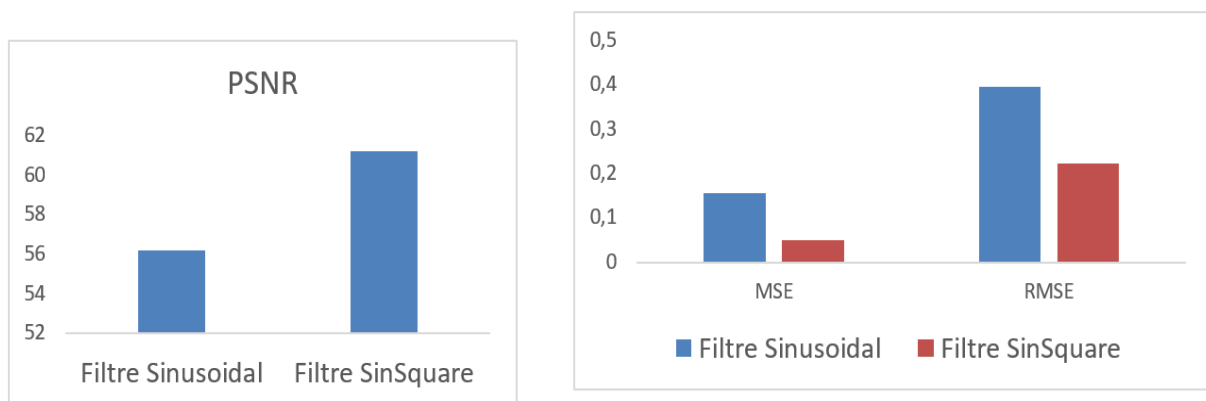


Figure 6 : Comparaison du PSNR, du MSE et du RMSE en dB des images reconstruites obtenues avec les filtres sinusoïdaux et SinSquare pour l'image du cameraman

Tableau 2 : Comparaison du PSNR, du MSE et du RMSE en dB des images reconstruites obtenues avec les filtres sinusoidaux et SinSquare pour l'image de Lena

Paramètres	Filtre Sinusoidal	Filtre SinSquare
PSNR	60,2283	74,4601
MSE	0,0622	0,0023
RMSE	0,2494	0,0484

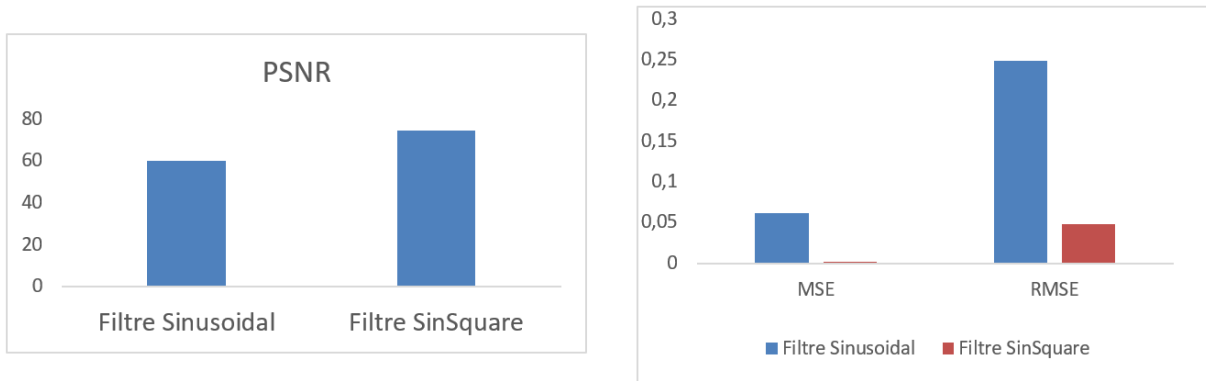


Figure 7 : Comparaison du PSNR, du MSE et du RMSE en dB des images reconstruites obtenues avec les filtres sinusoidaux et SinSquare pour l'image de Lena

Tableau 3 : Comparaison du PSNR, du MSE et du RMSE en dB des images expérimentales reconstruites avec les filtres sinusoidaux et SinSquare

Paramètres	Filtre Sinusoidal	Filtre SinSquare
PSNR	64,7598	73,2221
MSE	0,0219	0,0031
RMSE	0,1480	0,0559

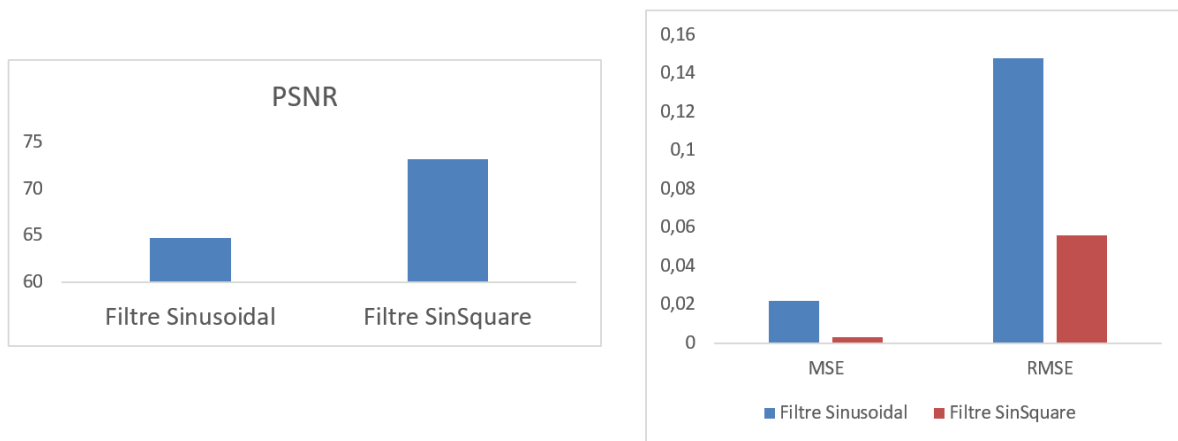


Figure 8 : Comparaison du PSNR, du MSE et du RMSE en dB des images expérimentales reconstruites avec les filtres sinusoidaux et SinSquare

Une image reconstruite en haute résolution est caractérisée par de faibles valeurs de l'erreur quadratique moyenne (MSE) et de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), ainsi que par des valeurs élevées du pic de rapport signal-bruit (PSNR) [27, 28]. L'objectif principal de cette étude est de démontrer qu'il est possible d'améliorer la qualité des images de basse qualité (LR) en générant des images de haute qualité (HR) à partir de celles-ci, en utilisant un filtre qui est la combinaison d'une modulation sinusoidale multipliée

par une fonction quadratique, bénéfique pour la reconstruction des images floues. Les résultats obtenus montrent que le filtre SinSquare développé est capable de générer des images HR à partir d'images LR avec des performances significatives. En effet, la fonction $\sin(2\pi pr + \varphi)$ introduit des variations périodiques qui améliorent le contraste et mettent en évidence certaines structures dans l'image. De plus, la composante $(2\pi pr + \varphi)^2$ amplifie les fréquences élevées, ce qui améliore la netteté des détails dans l'image et permet d'accéder à certaines hautes fréquences spatiales qui étaient auparavant imperceptibles, conduisant à un gain de résolution. Les valeurs élevées du PSNR comparées au filtre sinusoïdal montrent la capacité de ce filtre à atténuer certains bruits. Les artefacts présents dans l'image reconstruite avec le filtre SinSquare sont causés par les fluctuations de l'intensité lumineuse pendant l'acquisition de l'image et par le blanchiment uniforme de l'échantillon à chaque exposition à la source lumineuse [29]. Malgré la présence d'artefacts après la reconstruction, le gain de résolution reste perceptible à travers les paramètres calculés [28].

4. Conclusion

Cette étude a mis en lumière l'amélioration de la résolution des images microscopiques. Ce gain de résolution provient du filtre SinSquare, qui a été proposé afin d'optimiser la technique du multiplexage temporel de super-résolution. Le filtre proposé a été appliqué à deux types d'échantillons (images synthétiques et un spécimen de plante) au moyen de simulations numériques et de mesures expérimentales. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux obtenus avec un filtre existant. Une analyse comparative, à travers le calcul de paramètres tels que PSNR, MSE et RMSE, a démontré que les performances du filtre SinSquare surpassent celles du filtre sinusoïdal conventionnel. La prise en compte de ce filtre dans la technique du multiplexage temporel de super résolution contribuera à obtenir des images microscopiques de meilleure qualité, qui aideront dans les prises de décision dans des applications potentielles en recherche biologique, notamment pour l'examen de cellules de la taille d'un micron, où la demande d'analyses détaillées est de plus en plus importante.

Références

- [1] - K. PRAKASH, B. DIEDERICH, R. HEINTZMANN and L. SCHERMELLEH, "Super-resolution microscopy: a brief history and new avenues," *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 380 (2022) 20210110 p.
- [2] - E. K. ABBE, "Beiträge zur theorie des mikroskops und der mikroskopischen wahrnehmung", *Arch. Mikrosk. Anat.*, 9 (1) (1873) 413 - 418
- [3] - LORD RAYLEIGH, "On the theory of optical images, with special reference to the microscope", *Philos. Mag.*, 42 (255) (1896) 167 - 195
- [4] - C. CALLENBERG, A. LYONS, D. D. BROK et al., "Super-resolution time-resolved imaging using computational sensor fusion", *Sci Rep*, 11 (2021) 1689 p.
- [5] - B. WANG, L. ZOU, S. ZHANG and J. TAN, "Improving transverse resolution of confocal microscopy through spatiotemporal modulation," in *Proc. SPIE 9795, Selected Papers of the Photoelectronic Technology Committee Conferences Held June–July 2015, Vol. 9795*, (2015) 979510 p.
- [6] - A. ILOVITSH, V. MICO and Z. ZALEVSKY, "Super resolved optical system for objects with finite sizes using circular gratings," *Optics Express*, 23 (2015) 23667 - 23679
- [7] - A. W. LOHMANN, W. LUKOSZ, J. SCHWIDER, N. STREIBL and J. A. THOMAS, "Array illuminators for the optical computer," in *Proc. SPIE*, 963 (1988) 232 - 239
- [8] - A. ILOVITSH, E. PRETER, N. LEVANON and Z. ZALEVSKY, "Time multiplexing super-resolution using a Barker-based array," *Optics Letters*, 40 (2015) 163 - 165

- [9] - S. A. SHROFF, J. R. FIENUP and D. R. WILLIAMS, "OTF compensation in structured illumination super-resolution images," in Proc. SPIE 7094, Three-Dimensional and Multidimensional Microscopy : Image Acquisition and Processing XV, Vol. 7094 (2008) 70940F p.
- [10] - P. RANGARAJAN, V. R. BHAKTA and M. P. CHRISTENSEN, "Surpassing the diffraction limit of digital imaging systems using sinusoidal illumination patterns," *Journal of Optics A : Pure and Applied Optics*, 11 (2009) 105501 p.
- [11] - A. ILOVITSH, T. ILOVITSH, E. PRETER, N. LEVANON and Z. ZALEVSKY, "Super-resolution using Barker-based array projected via spatial light modulator," *Optics Letters*, 40 (2015) 1802 - 1805
- [12] - A. WHITING, A. F. ABOURADDY, B. E. A. SALEH, M. C. TEICH and J. T. FOURKAS, "Polarization-assisted transverse and axial superresolution," *Optics Express*, 11 (2003) 1714 - 1720
- [13] - A. ILOVITSH, S. ZACH, and Z. ZALEVSKY, "Contour superresolved imaging of static ground targets using satellite platform," *Applied Optics*, 51 (2012) 5863 - 5868
- [14] - J. GARCÍA, V. MICÓ, D. COJOC and Z. ZALEVSKY, "Full field of view super-resolution imaging based on two static gratings and white light illumination," *Applied Optics*, 47 (2008) 308 - 313
- [15] - W. LUKOSZ and A. BACHL, "Experiments on superresolution imaging of a reduced object field," *Journal of the Optical Society of America*, 57 (1967) 163 - 170
- [16] - S. PRASAD and X. LUO, "Support-assisted optical superresolution of low-resolution image sequences : the one-dimensional problem," *Optics Express*, 17 (2009) 23213 - 23233
- [17] - A. GHOLIPOUR , O. AFACAN, I. AGANJ and S. WARFIELD, " Super-Resolution MRI Reconstruction in Image, Frequency, and Wavelet Domains", Conference : Proceedings of International Society of Magnetic Resonance Imaging in Medicine 2014, (January 2014), At: Milan, Italy
- [18] - A. ILOVITSH and Z. ZALEVSKY, "Time multiplexing based extended depth of focus imaging," *Optics Letters*, 41 (2016) 183 - 186
- [19] - A. ILOVITSH, G. RAND, S. LEVAVI and Z. ZALEVSKY, "Extended depth of focus and aberration correction using time multiplexing," in Proc. SPIE 10077, Nanoscale Imaging, Sensing, and Actuation for Biomedical Applications XIV, Vol. 10077, (2017) 100770Q p.
- [20] - V. RICHTER, S. BRUNS, T. BRUNS, P. WEBER, M. WAGNER, C. M. CREMER and H. SCHNECKENBURGER, "Axial tomography in live cell laser microscopy," *Journal of Biomedical Optics*, 22 (2017) 091505 p.
- [21] - K. D. DONOHO et I. M. JOHNSTONE, "A Comprehensive Review on Image Denoising Algorithms", *Signal Processing*, (2005)
- [22] - MILAN SONKA, VACLAV HLAVAC et ROGER BOYLE, "Image Processing, Analysis, and Machine Vision", 2nd Edition, PWS Publishing, (1999)
- [23] - K. A. N. Y. A. L. S. NARAYANA, "A Survey of Image Denoising Algorithms", *International Journal of Computer Applications*, Vol. 121, N° 11 (2015)
- [24] - M. S. RAJ et S. K. LAKSHMANAN, "Wavelet-based Image Denoising using a SURE-based Thresholding Approach", *Journal of Signal Processing Systems*, Vol. 72, (2013) 179 - 188
- [25] - S. MALLAT, "A Wavelet Tour of Signal Processing", 2nd edition, Elsevier Academic Press, (1999)
- [26] - M.-F. A. YEBOUET, A. K. DIBY, K. A. KADUKI and J. T. ZOUEU, "Unstained blood smear contrast enhancement using spectral time multiplexing super resolution ", *J. Spectral Imaging*, 9, a1 (2020)
- [27] - G. SINGH and G. GOYAL, "Artificial Neural Networks for Single-Image Super-Resolution," *International Journal of Computer Applications*, 122 (2015) 8 - 12
- [28] - D. PANEK, C. RZAÇA, M. SZCZYPIOR, J. SORYSZ, K. MISZTAL, Z. BASTER et Z. RAJFUR, "Cross-system biological image quality enhancement based on the generative adversarial network as a foundation for establishing a multi-institute microscopy cooperative network "arXiv preprint arXiv :2403.18026, (2024)
- [29] - L. H. SCHAEFER, D. SCHUSTER and J. SCHAFFER, "Structured illumination microscopy : artefact analysis and reduction utilizing a parameter optimization approach," *Journal of Microscopy*, 216 (2004) 165 - 174