

L'EnderScope : une plateforme pédagogique ouverte pour l'imagerie computationnelle

Sirine GHARBI¹ David ROUSSEAU¹ Jérôme MUTTERER²

¹Université d'Angers, LARIS, INRAe, UMR IRHS, Angers, France

²CNRS, Université de Strasbourg, France
contact : david.rousseau@univ-angers.fr

Résumé – Nous détournons une imprimante 3D que nous transformons en imageur pouvant se déplacer selon 3 axes. Ce dispositif, nommé EnderScope, est piloté au moyen d'un simple nano-ordinateur de type Raspberry Pi . Ce projet, entièrement *open source*, permet d'explorer à très bas coûts de nombreux concepts en imagerie computationnelle, robotique, programmation. Les codes permettant de piloter le système sont mis à disposition sous la forme d'une bibliothèque Python, accessible via le lien GitHub [1].

Mots clés : Imagerie computationnelle, Imprimante 3D, Raspberry Pi, Open source.

Abstract – We are hacking a 3D printer and transforming it into a 3-axis moving imager. The device, called EnderScope, is controlled by a simple Raspberry Pi nanocomputer. This entirely open-source project enables us to explore a wide range of concepts in computational imaging, robotics and programming at very low cost. The codes used to control the system are available in the form of a Python library, accessible via the GitHub link [1].

Key words: Computational imaging, 3D printer, Raspberry Pi, Open source.

1 Introduction

L'imagerie computationnelle (IC) est un domaine interdisciplinaire qui combine l'informatique, l'optique et le traitement du signal pour améliorer, reconstruire ou générer des images à partir de données acquises de manière indirecte. Contrairement à l'imagerie traditionnelle, qui repose uniquement sur des capteurs physiques pour capturer des images, l'IC utilise des algorithmes avancés (comme l'intelligence artificielle, la reconstruction tomodographique ou la photographie numérique améliorée) pour extraire, traiter et interpréter l'information visuelle [2]. Alors que ce domaine se développe en recherche, il est encore peu diffusé dans l'enseignement post-bac au niveau de la pratique expérimentale via des dispositifs partagés par des communautés d'utilisateurs. Pour situer notre approche, citons quelques initiatives récentes en IC accessible, comme The Incubot, dédié à l'imagerie cellulaire en incubateur [6], un microscope Kerr modulaire pour l'imagerie magnétique [13], ou encore Enderscope.py, une bibliothèque que nous avons développée pour piloter un microscope automatisé open-source à base d'imprimante 3D [4]. Ces travaux illustrent l'essor de dispositifs optiques open-source alliant matériel low-cost et applications avancées.

Notre contribution s'inscrit dans la continuité du projet EnderScope proposé par Niamh et al. [3], qui introduisait un système de microscopie open-source pour l'analyse des microplastiques. Nous présentons ici une plateforme pédagogique ouverte [7], librement accessible sur les plans matériel et logiciel, permettant de produire des dispositifs d'IC à bas coût. Nous pointons vers des réalisations récentes et montrons une nouvelle extension en microscopie

proche infrarouge.

2 Présentation de l'EnderScope

L'EnderScope est un système d'imagerie microscopique automatisé en *open hardware*, c'est-à-dire un dispositif dont les plans, composants et logiciels sont librement accessibles et modifiables, initialement conçu pour l'analyse de la pollution par les microplastiques [3]. Ce microscope à faible coût, vient compléter de façon originale la panoplie de microscopes à bas coût [10] que l'on trouve dans la littérature. L'EnderScope est basé sur la mécanique d'une imprimante 3D. Dans notre cas, nous utilisons l'Ender 3 Pro (Figure 1). Il est à noter que le système pourrait être déployé sur n'importe quelle imprimante. La buse d'impression de l'imprimante est remplacée par un module optique, ce qui permet d'utiliser le système de mouvement fiable et bien calibré de l'imprimante 3D pour une numérisation pilotée par ordinateur. Le module optique peut être configuré en fonction des besoins expérimentaux. Dans l'article initial de l'EnderScope [3], la tête optique est composée de quatre pièces principales : une caméra haute qualité, un objectif avec une ouverture numérique de 0.17, un anneau de LED RGB et un Arduino Nano. Il est bien sûr possible d'imaginer diverses sortes de modifications comme nous le discutons dans la suite de cette communication.

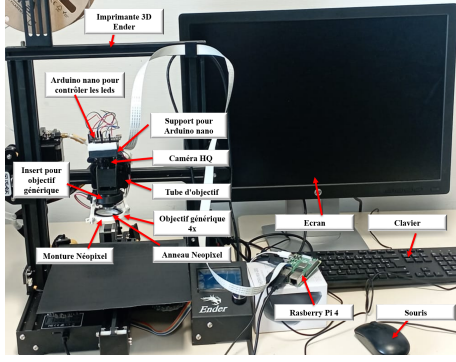


FIGURE 1 : Vue de la plateforme d'imagerie assemblée selon le format de l'article [3].

3 Imagerie computationnelle avec l'EnderScope

Le principe de l'EnderScope étant évolutif, nous avons développé de nouvelles modalités basées sur l'IC. Nous proposons notamment une imagerie dite "epsilon" [9] où une série d'images est acquise en variant plusieurs paramètres tels que l'angle d'éclairage (θ), les couleurs de l'éclairage (RGB) et la position selon l'axe Z de l'imprimante. Les images sont ensuite fusionnées pour réaliser une image meilleure qu'aucune des images prises individuellement comme l'illustre le schéma de principe de la Figure 2. Nous détaillons le principe des modalités d'imagerie que nous avons imaginées sur ce mode dans les sections suivantes. Les codes pour réaliser ces modalités d'imagerie sont accessibles sur le dépôt Github [1].

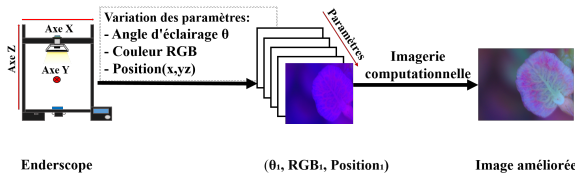


FIGURE 2 : Principe de l'imagerie computationnelle "epsilon" proposée avec l'EnderScope.

3.1 Imagerie Multi-angulaire

Dans cette modalité, on allume séquentiellement une seule LED de l'anneau d'éclairage en prenant une image pour chaque configuration. Une projection d'intensité minimale est appliquée aux images acquises afin de supprimer les réflexions lumineuses. Cette technique consiste à réduire le volume 3D en une image 2D en retenant, pour chaque pixel du plan, la plus faible intensité observée le long d'un axe donné (généralement l'axe z). Mathématiquement, la projection d'intensité minimale sur le plan xy s'exprime par :

$$I_{\min}(x, y) = \min_z [I(x, y, z)], \quad (1)$$

où x et y désignent les coordonnées spatiales du plan, z représente la profondeur, et $I(x, y, z)$ correspond à l'intensité du voxel situé en position (x, y, z) . De façon similaire, une projection d'intensité maximale peut être utilisée pour éliminer les ombres. Une vidéo présente la démonstration de cette modalité <https://www.youtube.com/watch?v=6pkMFw7jp8g>

3.2 Détection de focus

Nous avons également développé un algorithme de mise au point automatique qui ajuste la position de l'objectif le long de l'axe vertical (axe Z sur la Figure 2) en prenant une image pour un ensemble de positions en Z . La caméra initialement utilisée dans l'EnderScope ne dispose pas de mise au point automatique. On peut ainsi calculer une métrique de netteté de chaque image pour déterminer la position où la netteté est maximum [8]. La position où l'entropie est maximale est celle où l'image est la plus nette. Dans notre cas, nous avons implémenté l'entropie de Shannon (Figure 3). On pourrait bien sûr aussi imaginer une fonctionnalité dite de profondeur de champs étendue qui fusionnerait les images pour produire une image nette même si les objets de la scène ne sont pas positionnés dans le même plan objet. Une démonstration vidéo est accessible à l'adresse <https://www.youtube.com/watch?v=VoJjsEalR7A>.

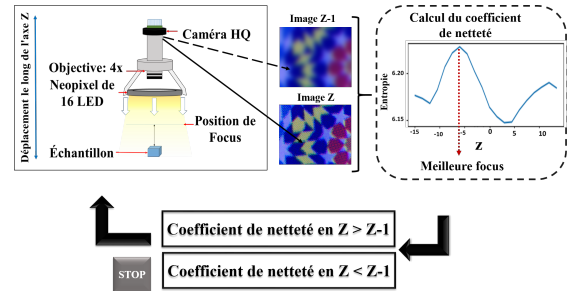


FIGURE 3 : Acquisition multi-Focus.

3.3 Smart scanning

On parle de smart scanning en microscopie quand l'acquisition de la scène à imager peut profiter d'information captée de façon dynamique et autonome par le microscope. Nous proposons une modalité de ce type. Pour ce faire, nous avons développé une nouvelle tête optique pour l'EnderScope qui a été remplacée par une caméra Arducam qui bénéficie d'une mise au point automatique. La séquence de smart scan est illustrée sur la Figure 4. Dans une première étape, la caméra est déplacée à la hauteur maximale le long de l'axe Z afin de capturer une image globale avec un champ de vision de 18×18 cm. Après cette première phase de numérisation, les centroïdes des objets d'intérêt sont détectés lors du premier scan. Un algorithme de type "voyageur de commerce" est ensuite appliqué pour déterminer le chemin optimal reliant ces centroïdes [12]. Enfin, chaque objet est capturé individuellement à distance la plus proche

de mise au point automatique, permettant ainsi une inspection visuelle détaillée sans avoir à réaliser un scan systématique de la scène. Concernant le temps de calcul et la complexité, l'algorithme de smart scanning automatique repose sur une détection initiale d'objets par des méthodes simples, suivie du déplacement de la tête optique. Comme illustré en Figure 4, le temps d'acquisition est réduit à 2,5 minutes, soit un facteur 20 par rapport à un scan systématique, tandis que la taille des données passe de 458 Mo à 22,9 Mo, en ne capturant que les zones d'intérêt identifiées dès le premier scan. Une démonstration vidéo est disponible à l'adresse suivante : https://www.youtube.com/watch?v=qtj_kktQ8ec9.

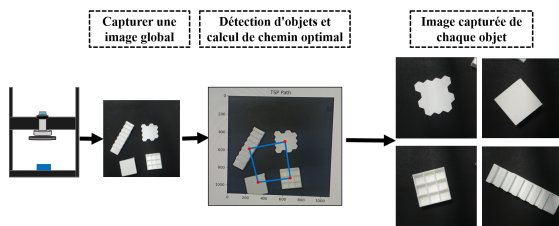


FIGURE 4 : Processus de smart scanning.

4 Extension à des sondes locales

L'aspect modulaire de la plateforme d'imagerie présentée dans les sections précédentes permet d'imaginer encore de nombreuses variantes. En particulier, il est possible de remplacer la caméra plein champ par une sonde locale. On peut penser à une sonde de température, de champ magnétique, ... permettant ainsi de produire des cartes de grandeurs physiques dans l'environnement scannable de notre système. À l'occasion de cette communication, nous proposons une nouvelle extension pour laquelle nous fournissons, comme pour les versions précédentes, toutes les ressources matérielles et logicielles afin d'en garantir la reproductibilité par les étudiants. Ces ressources sont détaillées sur le site <https://github.com/univ-angers>.

L'EnderNIRS est une nouvelle extension de l'imprimante 3D Ender, adaptée à la spectroscopie NIRS (Near InfraRed Spectroscopy), comme le montre la Figure 5. Cette modification repose sur le remplacement de la buse d'impression par une sonde ponctuelle (un spectromètre fibre de type NanoQuest), capable de mesurer la réflectance ou la transmittance des échantillons. Grâce au système de déplacement précis de l'imprimante 3D, l'EnderNIRS permet une analyse spectroscopique automatisée, offrant une solution accessible et modulable pour des applications variées telles que la caractérisation de matériaux.

La Figure 6 illustre le processus de construction d'un cube hyperspectral. D'abord, un balayage en raster scan est réalisé pour capturer les points de mesure (X, Y) . Ensuite, un spectre de réflectivité est acquis à chaque position. Enfin, ces spectres sont assemblés en un cube hyperspectral structuré selon les dimensions spatiales (X, Y) et spectrale (λ) . Une démo est fournie sur la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=M156EuGEvDs>

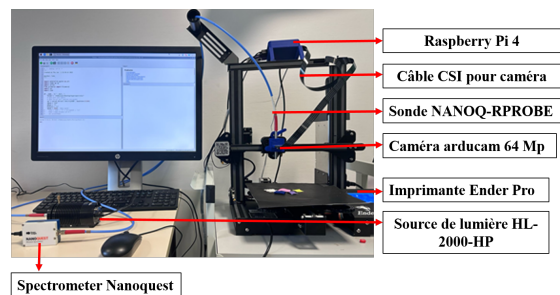


FIGURE 5 : Vue de la plateforme d'imagerie EnderNIRS assemblée.

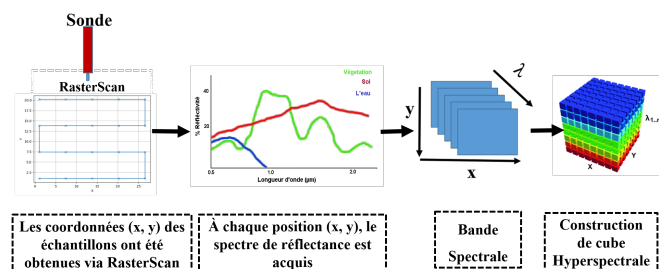


FIGURE 6 : Pipeline d'acquisition et de reconstruction d'imagerie hyperspectrale.

5 Perspectives pédagogiques

Les exemples d'applications de l'EnderScope montrés dans cette communication ne sont qu'un petit panel d'illustrations. On peut envisager de changer la source d'éclairage par un laser pour réaliser de l'imagerie cohérente de speckle [5], de l'imagerie sans lentille ou encore de la ptychographie [14]. On pourrait également imaginer remplacer les capteurs par un smartphone pour produire un système connecté [11]. À chaque nouveau système, il suffit de concevoir les pièces pour fixer les capteurs et les codes à exécuter comme nous l'avons fait ici pour la sonde ponctuelle de type NIRS.

Nous avons développé jusqu'ici le système dans le cadre de mini-projets et de stage étudiants. Le dispositif pourrait trouver sa place dans des parcours de traitement du signal au sens large via des cours d'imagerie, d'introduction à la programmation ou encore de robotique. Le système peut servir de métaprojet sur un Fablab afin d'initier les étudiants à CAO et l'impression 3D. Une réflexion sur la low-techisation est également envisageable afin de responsabiliser les étudiants à la différence entre des low-tech et des technologies low-cost. Dans ce cadre, on peut se poser la question de robustifier le système, d'éviter une dépendance à une marque d'imprimante 3D, de la possibilité de fabriquer le portique de scan 3D avec des matériaux de recyclage, ... Cette réflexion est actuellement en cours dans le module de lowtechisation de l'Université Technologique de Troyes de Stéphane Crozat (<https://lownum.scenari-community.org/projets/is03-25p/microscope/>). Enfin le dispositif présenté peut servir de projet interdisciplinaire via des applications en sciences du vivant ou en sciences de l'observation.

6 Conclusion

L'EnderScope représente une avancée significative dans l'enseignement et la démocratisation de l'IC. En proposant une plateforme accessible, modulable et à faible coût, il permet aux étudiants et aux chercheurs de développer et d'expérimenter des techniques avancées en imagerie, autrefois réservées aux laboratoires spécialisés. L'extension vers la spectroscopie proche infrarouge avec l'EnderNIRS ouvre de nouvelles perspectives pour l'analyse hyperspectrale et le traitement d'images complexes. Avec son système ouvert tant sur le plan des composants que sur le plan des codes, l'EnderScope est un système qui permet un fonctionnement communautaire de partage de connaissance pour les enseignants et les étudiants.

7 Annexe

Nous recensons l'ensemble du matériel nécessaire à la fabrication et à l'assemblage de l'EnderNIRS. Chaque élément est présenté avec sa désignation, la quantité requise, une source d'approvisionnement sous forme de lien et, lorsque disponible, son prix en euros. Il inclut divers composants électroniques, mécaniques et optiques, ainsi que les accessoires nécessaires à leur intégration. Cette liste permet d'assurer un suivi précis des composants et de faciliter leur approvisionnement pour la réalisation du dispositif. Les pièces 3D pour fixer le spectromètre NIRS sont disponibles sur le site https://github.com/PhysicsDptAngers/EnderScope_Angers.git

Partie	Qté	Source	Prix (€)
Ender 3 Pro	1	Lien	189
Clavier et Souris	1	Lien	15,48
Moniteur	1	Lien	89
HDMI-micro HDMI	1	Lien	7,08
Caméra Arducam 64 MP	1	Lien	69,50
Raspberry Pi 4 Model B	1	Lien	64,80
Câble CSI pour caméra Pi (100 cm)	1	Lien	6,32
Alimentation 5V USB Type C	2	Lien	9,69
Alimentation 5V USB	2	Lien	5,98
Câble USB type A - mini B	1	Lien	9,53
Câble USB type A - Micro USB	1	Lien	9,53
NanoQuest – Miniature Spectrometer by Ocean Insight	1	Lien	≈ 5000
Sonde NANOQ-RPROBE-600-VIS-NIR	1	Lien	
Source de lumière HL-2000-HP	1	Lien	9,81
Vis et écrou M6	4		
Vis et écrous M3	11	Lien	5,99
Vis et écrous M4	2	Lien	4,59
Le coût total de l'appareil	"	"	6067,67

TABLE 1 : Liste des composants pour l'EnderNIRS.

Références

- [1] Enderscopy - GitHub Repository library description. <https://github.com/mutterer/enderscopy>. Accessed : 2025-2-19.
- [2] Harrison H BARRETT et Kyle J MYERS : *Foundations of image science*. John Wiley & Sons, 2013.

- [3] Niamh BURKE, Gesine MÜLLER, Vittorio SAGGIOMO, Amy Ruth HASSETT, Jérôme MUTTERER, Patrick Ó SÚILLEABHÁIN, Daniel ZAKHAROV, Donal HEALY, Emmanuel G REYNAUD et Mark PICKERING : Enderscope : a low-cost 3d printer-based scanning microscope for microplastic detection. *Philosophical Transactions A*, 382(2274):20230214, 2024.
- [4] Sirine GHARBI, Emeric POIRAUD, Hugo LE GUENNO, Erwan GRANDGIRARD, Charly ROUSSEAU, Niamh BURKE, Jerome MUTTERER et David ROUSSEAU : Enderscope. py : A library for computational imaging using the enderscope automated microscope. *SoftwareX*, 31:102210, 2025.
- [5] Joseph W GOODMAN : *Speckle phenomena in optics : theory and applications*. Roberts and Company Publishers, 2007.
- [6] George OT MERCES, Conor KENNEDY, Blanca LENOCI, Emmanuel G REYNAUD, Niamh BURKE et Mark PICKERING : The incubot : A 3d printer-based microscope for long-term live cell imaging within a tissue culture incubator. *HardwareX*, 9:e00189, 2021.
- [7] Shane OBERLOIER et Joshua M PEARCE : General design procedure for free and open-source hardware for scientific equipment. *Designs*, 2(1):2, 2017.
- [8] Said PERTUZ, Domenec PUIG et Miguel Angel GARCIA : Analysis of focus measure operators for shape-from-focus. *Pattern Recognition*, 46(5):1415–1432, 2013.
- [9] Ramesh RASKAR : Computational photography : Epsilon to coded photography. In *LIX Fall Colloquium on Emerging Trends in Visual Computing*, pages 238–253. Springer, 2008.
- [10] Jesus SALIDO, Gloria BUENO, Jesus RUIZ-SANTAQUITERIA et Gabriel CRISTOBAL : A review on low-cost microscopes for open science. *Microscopy research and technique*, 85(10):3270–3283, 2022.
- [11] Si Kuan THIO et Sung-Yong PARK : A review of optoelectrowetting (oew) : from fundamentals to lab-on-a-smartphone (los) applications to environmental sensors. *Lab on a Chip*, 22(21):3987–4006, 2022.
- [12] Bladimir TOAZA et Domokos ESZTERGÁR-KISS : A review of metaheuristic algorithms for solving tsp-based scheduling optimization problems. *Applied Soft Computing*, 148:110908, 2023.
- [13] Koki UEBO, Yuto SHIOKAWA, Ryunosuke TAKAHASHI, Suguru NAKATA et Hiroki WADATI : Development of a magneto-optical kerr microscope using a 3d printer. *F1000Research*, 12(860):860, 2023.
- [14] Haechan J YANG, William WASSWA, Raymond LI, Brandon PAUTLER, Aidan FRY, Rajan LEUNG, David W HOLDSWORTH et Ian A CUNNINGHAM : Optical resolution and mtf of a low-cost fourier ptychography microscope using a raspberry pi computer. In *Optics and Biophotonics in Low-Resource Settings X*, volume 12832, pages 19–27. SPIE, 2024.