



**POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL**

UNIVERSITÉ
D'INGÉNIERIE

PHS3910 – TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES ET INSTRUMENTATION

Équipe : Lundi 03

Spectromètre

Fiche technique

Présenté à
Jean Provost
Lucien Weiss

Par :
Émile **Guertin-Picard** (2208363)
Philippine **Beaubois** (2211153)
Marie-Lou **Dessureault** (2211129)
Maxime **Rouillon** (2213291)

16 novembre 2024
Département de Génie Physique
Polytechnique Montréal

Table des matières

| | | |
|----------|---|----------|
| 1 | Description générale et spécifications | 1 |
| 2 | Rapports de tests | 2 |
| 2.1 | Conversion en longueurs d'onde et incertitude | 2 |
| 2.2 | Caractérisation de la résolution | 3 |
| 2.3 | Comparaison des deux spectromètres | 4 |
| 2.4 | Rapport détaillé des coûts | 5 |

1 Description générale et spécifications

Cette fiche technique présente les caractéristiques de deux spectromètres : l'un construit sur table optique et l'autre avec de l'impression 3D. Pour les deux appareils, le même système 4f est construit. La lumière passe au travers d'une fente de taille **XX** mm, ajustable sur la table optique (VA100), ou faite avec des lames de rasoir parallèles pour le système imprimé. Cette lumière est convergée avec une lentille de distance focale de 50 mm (LA-1213-A-ML) sur un réseau de diffraction blazé à 600 rainures/mm (GR25-0605) placé à un angle de **XX**° afin que la réflexion d'ordre 1 qui sépare les longueurs d'onde spatialement soit renvoyée vers une deuxième lentille de distance focale de 25 mm (LA-1560-A-ML). Cette réflexion, au travers de la lentille, place le spectre des longueurs d'ondes sur le capteur d'une caméra (DCC1545M-GL) pour l'analyse. Les deux appareils sont conçus pour que la caméra capte entre **397** nm et **666** nm. Le modèle imprimé présente une résolution de **XX ± XX** nm et un coût total de 877.28\$. Le modèle sur table optique a une résolution de **XX ± XX** nm et coûte 1852.72\$. Les deux spectromètres et leurs dimensions physiques sont présentés à la figure 1. Un résumé des spécifications des deux dispositifs sont présentées dans le tableau 1.

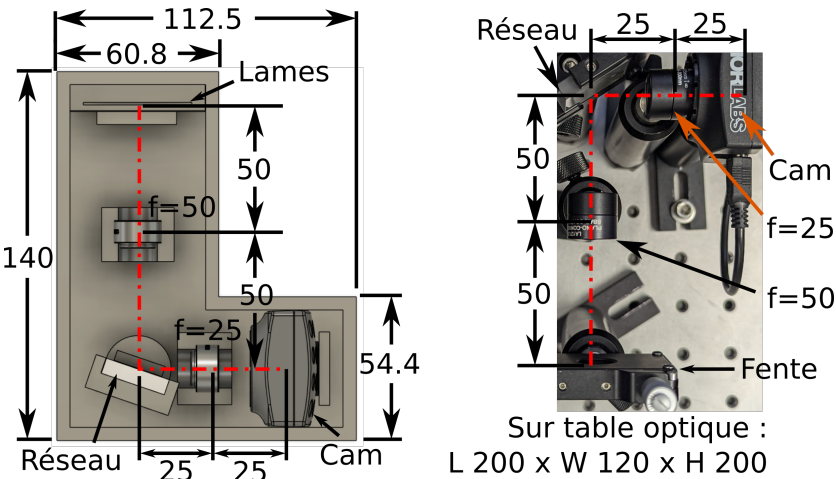


Figure 1 : Schémas des spectromètres. Toutes les dimensions sont en millimètres. À gauche : spectromètre fait par impression 3D sans son couvercle. À droite : spectromètre sur table optique.

Tableau 1 – Tableau des spécifications

| Spectromètre | Résolution (nm) | Dimensions (mm) | Coût \$CAD | Composantes | |
|---------------|-----------------|------------------------|------------|---|---|
| Table optique | ?? | L 200 × W 120 × H 200 | \$1,852.72 | ▷ LA-1560-A-ML ▷ LA-1213-A-ML ▷ NE506A ▷ GR25-0605 ▷ DCC1545M-GL ▷ VA100 ▷ KM100S | ▷ SMR05 ▷ TR3-P5 ▷ BA1 ▷ BA1S ▷ PH6 ▷ PH4 ▷ VC1 |
| Impression 3D | ?? | L 140 × W 112.5 × H 80 | \$877.28 | ▷ LA-1560-A-ML ▷ LA-1213-A-ML ▷ GR25-0605 | ▷ DCC1545M-GL ▷ Lames de rasoir |

2 Rapports de tests

L'objectif primaire de la construction de deux spectromètres séparés est de permettre la comparaison des coûts et de la performance des deux dispositifs. Cette section présente donc les tests qui ont été effectués pour caractériser les dispositifs, et présente les conclusions quant à la performance des dispositifs.

2.1 Conversion en longueurs d'onde et incertitude

Pour caractériser la résolution, plusieurs étapes intermédiaires sont nécessaires. La procédure décrite ci-dessous est la même pour la table optique et pour le spectromètre imprimé en 3D. Les images obtenues à l'aide de la caméra et du logiciel Thorcam sont sous forme d'un fichier .tif. Elles sont donc ouvertes sur python pour pouvoir traiter l'image sous forme de données brutes. Les fichiers tif contiennent des valeurs d'intensité entre 0 et 255 pour chaque pixel de la caméra. Il est important de mentionner que lorsque la valeur excède 255, l'intensité est dite saturée, dans ce cas de figure le scripte python s'arrête et avertit l'utilisateur de la situation. Ces cas sont évités car l'information réelle sur le spectre est perdue.

Une fonction python est créée de façon à générer une courbe d'intensité en fonction de la position horizontale en pixel de la caméra. Pour ce faire, une sélection préalable est faite en choisissant uniquement les lignes contenant plus que 50 % de l'intensité maximum, cette procédure permet de ne pas sélectionner les endroits de la caméra où l'intensité est complètement nulle sur toute la longueur. Une fois cette opération achevée, la moyenne des intensités sur chaque colonne est effectuée, ce qui retourne donc une valeur d'intensité pour chaque position de pixel horizontal. Cette étape est exécutée pour un laser bleu et un laser rouge.

Il est nécessaire de convertir l'échelle, initialement en pixel, en nanomètre. Pour ce faire la formule suivante a été utilisée :

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{rouge}} - \lambda_{\text{bleu}}}{x_{\text{rouge}} - x_{\text{bleu}}}(x - x_{\text{bleu}}) - \lambda_{\text{bleu}} \quad (1)$$

Dans cette équation λ représente la position horizontale avec une valeur en nm. Dans la même idée, λ_{rouge} et λ_{bleu} représentent la valeur en nm des pics d'intensité rouge et bleu. Pour sa part, x tout comme x_{rouge} et x_{bleu} représente une position sur une échelle en pixel. Avec cette formule il est possible de générer un graphique, comme à la figure 2, de l'intensité d'un faisceau en fonction de sa longueur d'onde.

Un aspect important à étudier qui n'est pas directement en lien avec la résolution est d'évaluer l'incertitude sur la position de nos pics d'intensité. Pour calculer cette incertitude, on utilise la formule suivante :

$$\Delta\lambda = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} + \Delta\lambda_{\text{bleu}} \quad (2)$$

avec

$$A = \frac{x - x_{\text{bleu}}}{x_{\text{rouge}} - x_{\text{bleu}}} \cdot \Delta(\lambda_{\text{rouge}} - \lambda_{\text{bleu}}) \quad (3)$$

$$B = \frac{-(\lambda_{\text{rouge}} - \lambda_{\text{bleu}}) \cdot (x - x_{\text{bleu}})}{(x_{\text{rouge}} - x_{\text{bleu}})^2} \cdot \Delta(x_{\text{rouge}} - x_{\text{bleu}}) \quad (4)$$

$$C = \frac{(\lambda_{\text{rouge}} - \lambda_{\text{bleu}})}{(x_{\text{rouge}} - x_{\text{bleu}})} \cdot \Delta\lambda_{\text{bleu}} \quad (5)$$

Dans les équations ci-dessus, on définit $\Delta\lambda_{bleu}$ comme l'incertitude sur la position (en nm) du laser bleu. Dans le cas présent, la fiche technique du laser donne une incertitude de 5nm [1]. Pour la position en nm du laser bleu, la valeur suivante sera donc utilisée : $\lambda = 405 \pm 5$ nm. On approxime que cette incertitude reste constante sur toutes les longueurs d'onde. Ainsi, il est obtenu que :

$$\Delta(\lambda_{rouge} - \lambda_{bleu}) = 2 \cdot \Delta\lambda_{bleu}. \quad (6)$$

Finalement le résultat suivant est donc obtenu : $\lambda_{rouge} - \lambda_{bleu} = (657 - 405) \pm 10$ nm. Pour finir, on considère que l'incertitude sur la position de n'importe quelle position en pixel est la plus petite division, soit 1 pixel. Le résultat suivant est donc obtenu : $\Delta(x_{rouge} - x_{bleu}) = 2$ pixels.

On remarque que l'incertitude sur la position varie de façon linéaire entre environ 5.5 et 15.5 nm, ce qui représente une incertitude relative d'environ 1% pour le bleu à 405 nm et d'environ 2% pour le rouge à 657 nm. On remarque également que le terme dominant dans le calcul d'incertitude, c'est à dire qui contribue le plus à la valeur de l'incertitude, est le terme A. En fait, il s'agit plus précisément du terme $\Delta(\lambda_{rouge} - \lambda_{bleu})$ qui fait augmenter de beaucoup la valeur de cette partie. On peut donc conclure qu'une façon efficace de réduire l'incertitude sur la position pour les spectromètres est de réduire le plus possible l'incertitude sur la position du laser bleu. Puisque cette valeur d'incertitude vient de la fiche technique du laser, on en déduit qu'il faudrait trouver un laser plus précis pour réduire l'incertitude globale de la position sur le spectromètre, ou qu'il faudrait étalonner le laser utilisé avec un autre appareil pour préciser sa longueur d'onde centrale.

2.2 Caractérisation de la résolution

La résolution est définie comme étant la plus petite distance entre les centres de deux faisceaux qui permet de les distinguer. On considère que lorsque les deux faisceaux se chevauchent à la moitié de leur intensité maximale, il n'est plus possible de les distinguer. La largeur à mi-hauteur $FWHM$ de chaque faisceau sur le capteur est donc considérée. Pour caractériser l'appareil, on suppose que les faisceaux d'intérêt ont la largeur à mi-hauteur du plus faisceau le plus étroit testé. La résolution est alors donnée par l'équation 7.

$$\text{Résolution} = \frac{1}{2}(FWHM_1) + \frac{1}{2}(FWHM_2) = \frac{2}{2}FWHM = FWHM \quad (7)$$

Pour des faisceaux plus larges, ce ne serait pas la résolution du spectromètre qui limiterait la résolution obtenue, mais le profil des faisceaux utilisés. Cela est cohérent, car il est préférable d'utiliser un appareil dans des cas où ce n'est pas sa résolution qui est limitante.

La largeur à mi-hauteur est déterminée en trouvant les points ayant la moitié de l'intensité maximale. Ils sont toujours deux, de part et d'autre du centre, grâce au profil gaussien des faisceaux laser, comme illustré à la figure 2. Il suffit de prendre la différence entre les deux pour obtenir $FWHM$ et, donc, la résolution.

Dû à la nature discrète du spectre obtenu, il est courant que l'intensité à mi-hauteur ne corresponde pas directement à un point. Le point ayant l'intensité la plus proche de la moitié de l'intensité maximale, tout en étant plus faible que celle-ci, est pris. De cette façon, la largeur à mi-hauteur risque d'être légèrement surestimée, mais elle ne peut pas être sous-estimée. L'incertitude sur cette mesure correspond à la plus petite division de l'échelle en nm, puisque, de chaque côté, on peut être légèrement décalé par rapport à la valeur définie précédemment.

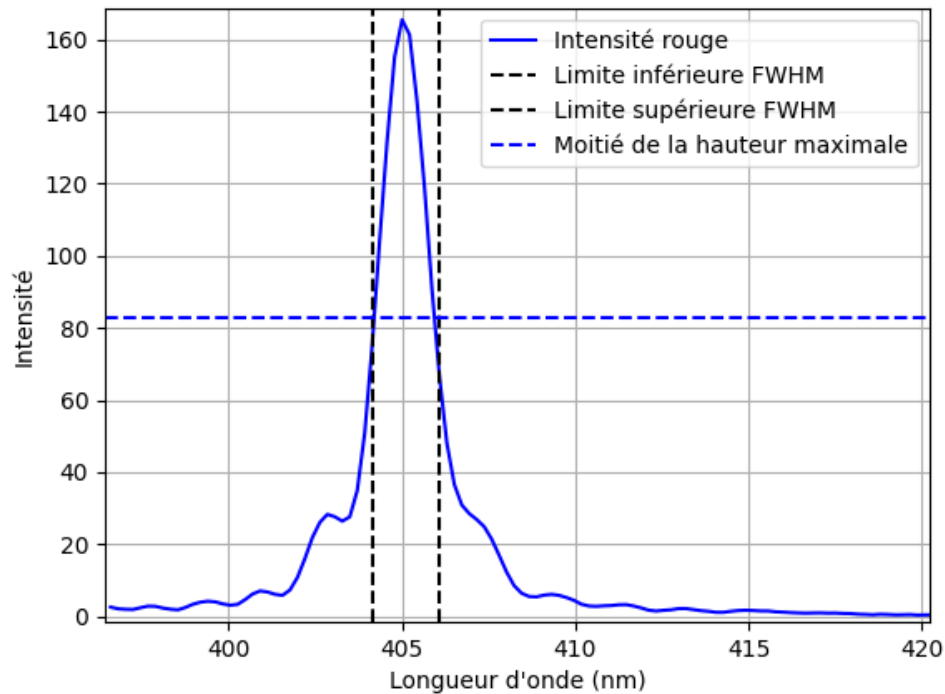


Figure 2 : Calcul de FWHM sur la courbe d'intensité obtenue pour le laser bleu avec le spectromètre imprimé en 3D. Zoom sur l'intervalle [396, 420] nm

2.3 Comparaison des deux spectromètres

L'incertitude de la résolution est d'environ 0,4 nm et les résultats des résolutions obtenues sont présentés au tableau 2.

| Spectromètre | Résolution (nm) |
|-------------------|-----------------|
| Imprimé en 3D | $1,9 \pm 0,4$ |
| Sur table optique | $1,5 \pm 0,4$ |

Tableau 2 – Résolution pour les deux spectromètres testés

La résolution obtenue pour le spectromètre sur table optique est de $(1,5 \pm 0,4)$ nm, ce qui est meilleur que celle obtenue pour le spectromètre imprimé en 3D, de $(1,9 \pm 0,4)$ nm. Les difficultés d'alignement, qui sont plus importantes pour le spectromètre imprimé en 3D, ont pesé dans la balance, notamment pour l'angle du réseau de diffraction et l'angle d'entrée du laser. En ajustant l'angle du réseau de diffraction, il arrive à de nombreuses reprises d'avoir le rouge ou le bleu sur la caméra, mais pas les deux. Avec de multiples essais, l'alignement permettant d'avoir les deux simultanément est possible, mais il peut s'accompagner d'aberrations provenant des lentilles, puisque les rayons extrêmes se trouvent à passer très près du bord de celles-ci. Le système utilisé permet d'ajuster l'angle, mais pas de le fixer, donc l'ajustement est à recommencer avant une série de prises de mesures si l'appareil a été déplacé. L'angle d'entrée du laser importe puisqu'il détermine la position des rayons sur la caméra. Il doit donc toujours être envoyé perpendiculairement à la fente pour des résultats répétables, ce qui est plus facilement réalisable sur une

table optique où le laser est maintenu à un endroit fixe par rapport au spectromètre.

La fente affecte également la résolution, puisque sa largeur affecte directement la largeur du spectre obtenu sur la caméra. Là encore, la table optique, avec un équipement plus coûteux certes, permet un contrôle de l'ouverture bien plus précis que les lames de rasoirs utilisées pour le spectromètre 3D. L'espace entre celles-ci est plus large, ce qui affecte les résultats des tests. Il est également plus difficile d'assurer qu'elles forment une fentre rectangulaire, mais cet élément n'affecte pas la résolution de manière conséquente étant donné le traitement fait sur les données. La table optique a pour sa part une limitation majeure ; il y est plus difficile de s'assurer que les lentilles sont positionnées au bon endroit, c'est-à-dire à une longueur focale de l'élément qui la précède et qui la suit. Cela pourrait avoir comme effet de rendre l'image plus floue, car les principes utilisés ne sont valables que pour une configuration 4f, donc en ayant une configuration approximative, il y a risque de rendre l'image approximative, donc de nuire à la résolution.

Les tests des deux spectromètres avec un laser rouge sont présentés et comparés au résultat d'un spectromètre commercial. La largeur à mi-hauteur du laser rouge obtenue avec chaque spectromètre est présentée au tableau 3. L'incertitude sur la résolution du spectromètre commercial est prise comme la plus petite graduation sur l'échelle des longueurs d'onde, soit 0,8 nm.

| Spectromètre | Largeur à mi-hauteur (nm) |
|-------------------|---------------------------|
| Imprimé en 3D | $8,0 \pm 0,4$ |
| Sur table optique | $2,3 \pm 0,4$ |
| Commercial | $12,1 \pm 0,8$ |

Tableau 3 – Résolution pour les deux spectromètres testés et le spectromètre commercial

Aucun des deux spectromètres n'obtient la même largeur à mi-hauteur que le spectromètre commercial. La largeur à mi-hauteur obtenue avec le spectromètre sur table optique, de $(2,3 \pm 0,4)$ nm, est beaucoup plus faible que celles obtenues avec le spectromètre imprimé en 3D, de $(8,0 \pm 0,4)$ nm ou avec le spectromètre commercial, de $(12,1 \pm 0,8)$ nm. Les deux spectromètres s'accordent sur le fait que le laser rouge a un profil plus large que le laser bleu.

Alors que pour le bleu, les spectromètres tombent d'accord, il n'y a pas de largeur à mi-hauteur commune donnée par les trois spectromètres. Cela peut être dû à une combinaison des aberrations des lentilles, aux enjeux d'alignement, de positionnement des éléments optiques et de contrôle de la fente. Le laser rouge ayant un profil plus large, il est plus sujet aux aberrations des lentilles qui n'affectent pas le faisceau églement en fonction de la position (extrême au centrale) où elle est traversée. Il est également plus sujet aux clippage à cause de sa largeur. Pour couronner le tout, ce laser n'est pas aligné avec son boîtier, donc il est probable qu'il n'entre pas correctement dans le système optique.

Sans avoir d'information sur le spectromètre commercial utilisé, la confiance est tout de même supérieure pour le résultat obtenu avec ce spectromètre. Les spectromètres semblent donc sous-estimer la largeur deux laser rouge testé, avec un effet moins prononcé pour le spectromètre imprimé en 3D que celui sur table optique. Les spectres de diodes électroluminescentes testées sont toutefois cohérents, ce qui semblerait indiquer que cette aberration des systèmes est davantage un enjeu pour les longueurs d'onde extrêmes tirant sur le rouge, plutôt que pour tout le spectre.

2.4 Rapport détaillé des coûts

Les méthodes de construction étant grandement différentes pour les deux spectromètres, une étude des coûts est faite afin de déterminer lequel des deux est le plus abordable. Pour ce faire, une liste détaillée des

pièces requises est faite, et le total des coûts est calculé en dollars canadiens avant taxes. Sauf exception, tous les prix proviennent de Thorlabs [2]. La table 4 présente les coûts des pièces pour le système monté sur table optique :

Tableau 4 – Liste des pièces et coûts totaux pour le spectromètre sur table optique [2]

| ID pièce | Description | Qté | \$ CAD | Total ind. |
|--------------|----------------------------------|-----|----------|------------|
| LA-1560-A-ML | Lentille plano-convexe $f=25$ mm | 1 | \$72.25 | \$72.25 |
| LA-1213-A-ML | Lentille plano-convexe $f=50$ mm | 1 | \$70.61 | \$70.61 |
| NE506A | Filtre atténuateur de lumière | 2 | \$59.55 | \$119.10 |
| GR25-0605 | Réseau de diffraction 600/mm | 1 | \$178.32 | \$178.32 |
| DCC1545M-GL | Caméra USB | 1 | \$539.21 | \$539.21 |
| VA100 | Fente ajustable | 1 | \$417.74 | \$417.74 |
| KM100S | Montage à réseau de diffraction | 1 | \$130.45 | \$130.45 |
| SMR05 | Trou taraudé pour lentilles | 2 | \$28.68 | \$57.35 |
| TR3-P5, | 5 tiges pour optiques | 1 | \$38.50 | \$38.50 |
| BA1 | Pied de montage optique | 2 | \$8.42 | \$16.85 |
| BA1S | Pied de montage optique | 4 | \$7.83 | \$31.30 |
| PH6 | Base pour tiges d'optique | 5 | \$20.43 | \$102.17 |
| PH4 | Base pour tiges d'optique | 1 | \$14.83 | \$14.83 |
| VC1 | Pince en V | 1 | \$64.04 | \$64.04 |
| | | | Total : | \$1,852.72 |

Quelques points sont à relever pour cette table. La caméra utilisée est maintenant indisponible à l'achat sur le site de Thorlabs. Le prix affiché est donc le prix de cette pièce avant qu'elle soit enlevée du site en 2021 [3]. Aussi, deux éléments importants ont été omis de cette liste. La quincaillerie, soit les vis, les écrous et les rondelles, n'ont pas été comptées car ces derniers sont fréquemment disponibles en vrac dans des ateliers, ou ils s'achètent en ensemble à moindre coût. La table pour fixer les éléments optiques n'a pas été comptée non plus car elle ne servait pas que pour le spectromètre construit. Sa taille, donc son prix est donc beaucoup trop grand par rapport au besoin du projet. L'appareil construit fonctionnerait sur la table B1212F, mesurant 12 x 12 po. Avec un coût de 966.85\$, le total serait amené à 2819.57\$. L'achat de cette table pourrait toutefois ne pas être justifiable pour un laboratoire étant donné sa taille restreinte, donc des options plus grandes seraient à considérer.

La table 5 montre le calcul des coûts pour le modèle fait par l'impression 3D :

Tableau 5 – Liste des pièces et coûts totaux pour le spectromètre avec impression 3D [2] [4]

| ID pièce | Description | Qté | \$ CAD | Total ind. |
|--------------|----------------------------------|-----|----------|------------|
| LA-1560-A-ML | Lentille plano-convexe $f=25$ mm | 1 | \$72.25 | \$72.25 |
| LA-1213-A-ML | Lentille plano-convexe $f=50$ mm | 1 | \$70.61 | \$70.61 |
| GR25-0605 | Réseau de diffraction 600/mm | 1 | \$178.32 | \$178.32 |
| DCC1545M-GL | Caméra USB | 1 | \$539.21 | \$539.21 |
| - | Impression 3D | 1 | \$6.94 | \$6.94 |
| - | Ensemble de lames de rasoir | 1 | \$9.95 | \$9.95 |
| | | | Total : | \$877.28 |

Un élément a aussi été exclu de cette liste, soit l'imprimante 3D utilisée pour l'impression. Celle utilisée,

soit la Original Prusa i3 MK3S+, est disponible pour 899\$ US, ou 1245.21\$ CAD [5] . Si considéré, ce prix augmente grandement les coûts associé à ce modèle de spectromètre, étant plus dispendieux que le total calculé. Toutefois, ce type d'imprimante est facilement accessible gratuitement en faisant affaire avec certains ateliers. Aussi, pour de faibles quantités de pièces, il est possible de commander des impressions en ligne pour beaucoup moins cher que l'imprimante. C'est donc pourquoi son prix a été omis.

Il est donc facile de conclure que l'impression 3D est beaucoup plus avantageux économiquement. Le prix de l'impression sous 10\$ est une très grande économie lorsque comparé aux nombreuses pièces servant au montage sur table optique qui ont fortement contribués au coût élevé du modèle qui les requiert. L'économie de 975.44\$ en allant avec le modèle imprimé est considérable, et étant donné sa performance respectable, c'est le modèle à préconiser.

Références

- [1] Compact Laser Modules with Phono Jack, 2024. URL <https://www.thorlabs.com>.
- [2] Thorlabs - Photonics Products & Solutions, 2024. URL <https://www.thorlabs.com>.
- [3] Thorlabs - DCC1545M USB 2.0 CMOS Camera, 1280 x 1024, Monochrome Sensor, 2021. URL <https://www.thorlabs.com>.
- [4] RAZOR BLADES 100PK, 2024. URL <https://directlift.ca/razor-blades-100pk/>.
- [5] Josef Prusa. Imprimante 3D Original Prusa i3 MK3S+ MMU3 kit Bundle, 2024. URL <https://www.prusa3d.com/fr/produit/imprimante-3d-original-prusa-i3-mk3s-mmu3-kit-bundle/>.