

# Guide complet

Mise à jour du hardware et software de deux  
spectrofluorimètres



**Auteur :**  
Youssef BOUSSALEM

**Rôle :**  
Stagiaire, étudiant en 4ème année à l'INSA Strasbourg

**Encadrant :**

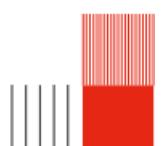
Lorry Engel

**Rôle :**

Ingénieur en électronique

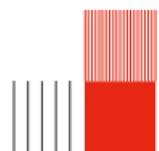
**IPCMS - Institut de Physique et Chimie des Matériaux de  
Strasbourg**

1<sup>er</sup> août 2025



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Manuel de fabrication</b>	<b>2</b>
1.1	Où trouver les ressources pour ce projet ? . . . . .	2
1.2	Analyse des spectrofluorimètres récupérés . . . . .	2
1.3	Mise à jour du spectrofluorimètre A . . . . .	3
1.3.1	Éléments nouveaux . . . . .	3
1.3.2	Démontage . . . . .	5
1.3.3	Montage . . . . .	5
1.3.4	Configuration et étalonnage . . . . .	6
1.4	Mise à jour du spectrofluorimètre B . . . . .	7
1.4.1	Éléments nouveaux . . . . .	7
1.4.2	Démontage des monochromateurs . . . . .	9
1.4.3	Montage des monochromateurs . . . . .	11
1.4.4	Démontage du boîtier central . . . . .	13
1.4.5	Montage du boîtier central . . . . .	13
1.4.6	Configuration et étalonnage . . . . .	13



# Chapitre 1

## Manuel de fabrication

### 1.1 Où trouver les ressources pour ce projet ?

L'ensemble des ressources de ce projet est disponible sur GitHub :  
<https://github.com/YoussefBoussalem/Spectrofluorimetre>.

Vous y trouverez tout le nécessaire pour mener à bien ce projet : le code source, les schémas électriques ainsi que les pièces à imprimer.

### 1.2 Analyse des spectrofluorimètres récupérés

Deux spectrofluorimètres ont été récupérés :

- Le premier, un **Spex 1680B 0.22m Double Spectrometer**, sera désigné par la suite comme \*spectrofluorimètre A\*.
- Le second, un **Fluorolog 3-11**, sera désigné comme \*spectrofluorimètre B\*.



FIGURE 1.1 – Photo d'un monochromateur du spectrofluorimètre A

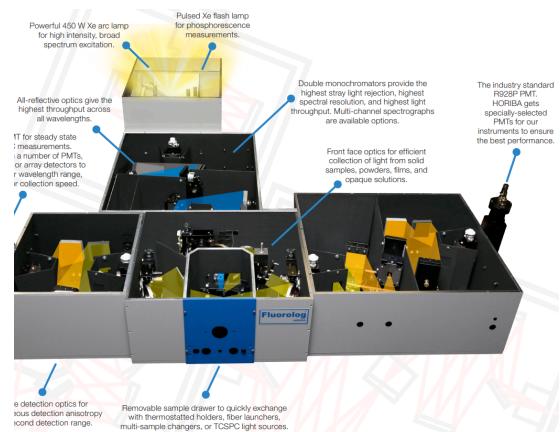


FIGURE 1.2 – Photo du spectrofluorimètre B

Ces deux modèles sont des spectrofluorimètres à double réseau de diffraction, permettant une meilleure résolution spectrale. Ils utilisent des moteurs pas à pas pour l'actionnement, ainsi que des solénoïdes pour contrôler les obturateurs (\*shutters\*).

Ils sont pilotés principalement à l'aide :

- de cartes Arduino Uno, accompagnées de shields et de drivers pour moteurs pas à pas ;
- d'une Raspberry Pi ;
- d'un microcontrôleur ATTiny414 pour le comptage du signal issu du tube photomultiplicateur ;
- de circuits imprimés (PCB) conçus pour les capteurs et le pilotage des solénoïdes.



Les différences majeures entre les deux spectrofluorimètres sont les suivantes :

- Les monochromateurs du spectrofluorimètre A intègrent un système mécanique permettant de linéariser la relation entre l'angle du réseau de diffraction et la longueur d'onde de sortie. Ce dispositif est absent du spectrofluorimètre B, où la relation est de la forme :  $\lambda = \lambda_0 + A \sin(k\theta)$ . Voir [1] pour plus de détails.
- Bien que les deux modèles soient équipés de fentes, celles du spectrofluorimètre A ne sont pas motorisées et doivent être réglées manuellement.
- Le spectrofluorimètre A utilisait initialement un tube photomultiplicateur pour la détection du signal de référence. Celui-ci a été remplacé par une photodiode **S1223-01**, nécessitant la fabrication d'un support ajustable à monter dans la chambre optique (où est placé l'échantillon).
- Le spectrofluorimètre A utilise des interrupteurs de fin de course comme capteurs de position, tandis que le spectrofluorimètre B utilise des capteurs optiques infrarouges. Un PCB spécifique est donc requis pour faire fonctionner les monochromateurs du modèle B.

La stratégie globale adoptée pour la remise en état et la modernisation des appareils a été la suivante :

- Montage de l'Arduino, du shield, des drivers et des PCB nécessaires au pilotage.
- Installation des programmes et bibliothèques nécessaires sur l'Arduino et la Raspberry Pi.
- Démontage des spectrofluorimètres pour accéder aux monochromateurs et à l'intérieur des chambres optiques.
- Intégration des composants nécessaires à l'intérieur des monochromateurs puis du boîtier central.
- Assemblage final des différents éléments, configuration des dispositifs puis étalonnage.

La suite de ce chapitre détaille, étape par étape pour chaque spectrofluorimètre, les procédures à suivre pour mener à bien la réalisation du projet.

## 1.3 Mise à jour du spectrofluorimètre A

### 1.3.1 Éléments nouveaux

#### Raspberry Pi – Installation

Si ce n'est pas déjà fait, procurez-vous une Raspberry Pi accompagnée d'un clavier, d'une souris et disposant d'un nombre suffisant de ports USB pour y connecter deux Arduino Nano ainsi qu'un ATtiny414.

Nous recommandons un modèle de Raspberry Pi disposant d'au moins 4 ports USB, ainsi que le **clavier officiel Raspberry Pi**, qui permet également d'étendre le nombre de ports.

Si votre Raspberry Pi est livrée avec un boîtier (recommandé), montez celui-ci, puis installez l'OS à l'aide de la carte micro SD fournie, ou en utilisant l'outil \*Raspberry Pi Imager\* sur une carte vierge.

Assurez-vous que Python 3 est bien installé et à jour. Vous pouvez le vérifier dans l'invite de commande avec la ligne suivante : **python -V**.

Enfin, installez les bibliothèques nécessaires :

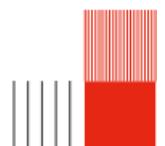
- Installation de PyYAML via la commande : **pip3 install PyYAML**

L'installation du logiciel Arduino sur la Raspberry Pi n'est pas nécessaire. Toutefois, le téléchargement du programme sur les deux Arduino Uno est indispensable.

#### Arduino Uno, Shield et Drivers

Le montage se fait avec un Arduino Uno, un shield compatible CNC et les drivers correspondants, comme ceux du **kit ARD-CNC-Kit1**.

Le montage doit suivre précisément les instructions de la documentation technique du kit. Soyez particulièrement vigilant au sens de montage des drivers, et veillez à bien installer les radiateurs sur ceux-ci.



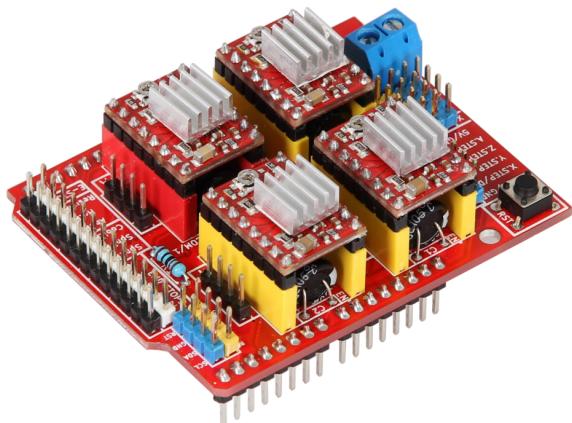


FIGURE 1.3 – Image du shield Arduino avec les 4 drivers du kit CNC

Pour le spectrofluorimètre A, un seul driver est nécessaire : il sert à contrôler le moteur responsable de l'orientation du réseau de diffraction.

#### Alimentation des moteurs

Les moteurs des deux spectrofluorimètres sont alimentés par une source 9V (12V est également compatible). Pour le spectrofluorimètre A, une alimentation de 1A suffit, tandis que pour le modèle B, il est recommandé de prévoir au moins 3A.

Chaque monochromateur nécessite sa propre alimentation : comptez donc deux alimentations par spectrofluorimètre.

Afin de pouvoir utiliser les modèles 3D fournis sans modification, nous conseillons de choisir :

- une alimentation avec une prise *barrel jack*,
- deux ports de connexion 5.5 mm × 2.1 mm,
- un interrupteur (optionnel) de dimensions 19 mm × 13 mm.



FIGURE 1.4 – Photo d'une ali-  
mentation DC



FIGURE 1.5 – Photo du connec-  
teur d'alimentation

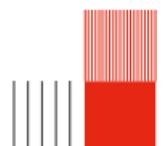
#### Impression 3D

Pour effectuer l'assemblage complet, les pièces suivantes doivent être imprimées :

- **SPECA - monochromator - Part 1** (2 exemplaires)
- **SPECA - monochromator - Part 2** (2 exemplaires)

Si vous optez pour le remplacement du tube photomultiplicateur par une photodiode, il sera également nécessaire d'imprimer les pièces suivantes :

- **SPECA - ref diode holder - CAP**
- **SPECA - ref diode holder - SLIDER**
- **SPECA - ref diode holder - TOWER**



### 1.3.2 Démontage

#### Séparation des boîtiers

Commencer par séparer les différents boîtiers afin d'accéder à l'intérieur des monochromateurs et du boîtier central. Pour cela, dévisser les vis reliant les différents modules.

#### Ouverture des monochromateurs

Placer les monochromateurs sur leur flanc pour accéder aux éléments électroniques situés en dessous, puis retirer la tôle de protection en dévissant toutes les vis.

Démonter ensuite la plaque frontale du monochromateur et déconnecter les câbles du PCB.



FIGURE 1.6 – Photo de l'intérieur d'un monochromateur

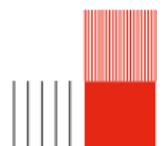
### 1.3.3 Montage

Couper les câbles d'origine puis les sertir afin de pouvoir les connecter directement à l'Arduino Uno et à son shield CNC.

Connecter les éléments comme suit :

- Brancher les 4 fils du moteur pas à pas (les deux aux extrémités et les deux centraux parmi les 6) sur les bornes du driver X du shield.
- Brancher les capteurs de fin de course au shield :
  - Le capteur correspondant à la longueur d'onde la plus faible sur la broche **RESET/ABORT**.
  - Le second capteur sur la broche **FEED/HOLD**.

Enfin, monter l'Arduino sur la pièce **SPECA - monochromator - Part 2**. Faire passer le câble Arduino, le bouton, et le connecteur d'alimentation DC à travers l'assemblage avec la pièce **SPECA - monochromator - Part 1**, puis visser l'ensemble à l'avant du monochromateur.



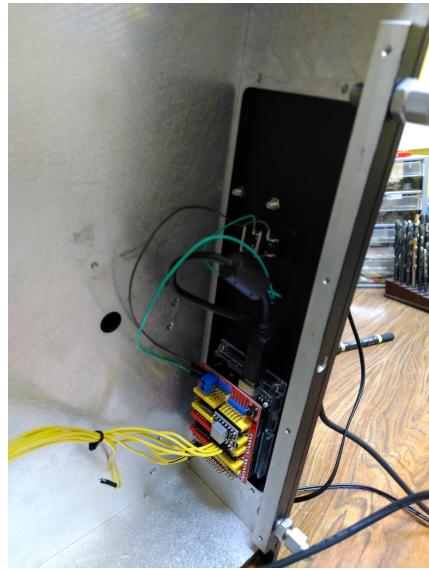


FIGURE 1.7 – Photo de l’intérieur d’un monochromateur avec l’Arduino Uno monté

#### 1.3.4 Configuration et étalonnage

Pour que le spectrofluorimètre fonctionne correctement, deux étapes sont nécessaires :

- Configurer le sens de rotation des moteurs.
- Étalonner les monochromateurs.

##### Configuration des moteurs

La configuration s’effectue via une communication série avec l’Arduino Uno. Pour cela, utiliser l’IDE Arduino depuis un ordinateur ou depuis la Raspberry Pi (l’IDE n’est pas installé par défaut).

Voici les commandes de base utilisées pour configurer les moteurs :

- MOVE,<Nom Du Moteur>, <Nombre de pas>, <Sens de rotation (0 ou 1)>
- Les noms de moteurs reconnus sont : WL, SLIT1, SLIT2, et SLIT3, qui correspondent respectivement au :
  - moteur d’orientation du réseau de diffraction,
  - moteur de la fente au-dessus du port de connexion,
  - moteur de la fente centrale,
  - moteur de la fente la plus éloignée du port.

Aucune convention de sens n’étant imposée au câblage des moteurs, il est nécessaire de configurer manuellement leur direction dans le fichier de configuration Arduino :

- Ouvrir le fichier **config.h** utilisé dans le code Arduino (ligne 2). Adapter ce fichier selon que vous utilisez le premier ou le second monochromateur (type A ou B).
- Dans la structure **motors[]**, ajuster la vitesse de chaque moteur. Celle-ci est définie par le temps d’attente entre deux pas : diminuer ce temps pour accélérer, l’augmenter pour ralentir. Le but est d’obtenir une rotation fluide, sans à-coups.
- Modifier la variable **zeroDirection** (avant-dernière variable) en LOW ou HIGH afin que la direction 0 de la commande MOVE corresponde à :
  - une diminution de la longueur d’onde pour le moteur WL ;
  - une fermeture de fente pour les moteurs SLIT.

Une fois cette configuration terminée, téléverser le programme sur l’Arduino.

##### Configuration série et étalonnage

Ouvrir le programme Python et localiser le fichier YAML correspondant au spectrofluorimètre de type A ou B dans le dossier **SYSTEM\_CONFIG**.



Effectuer les réglages suivants :

- Modifier les ports de connexion pour chaque monochromateur :  
`/dev/ttyUSB<numero du port>` (entre 1 et 4).
- Déterminer les coefficients de conversion entre nombre de pas moteur et longueur d'onde :
  - Pour les monochromateurs de type A :  
relation linéaire :  $\lambda = \lambda_0 + \alpha \cdot k_{\text{pas}}$ .
  - Pour les monochromateurs de type B :  
relation non linéaire :  $\lambda = \lambda_0 + \alpha \cdot \sin(\beta \cdot k_{\text{pas}})$ .
- Pour les monochromateurs de type B, calibrer également la résolution spectrale (longueur d'onde par pas) selon une relation linéaire.
- Enfin, ajuster expérimentalement les valeurs minimale et maximale de pas autorisées pour chaque moteur. Cela permet de garantir que les longueurs d'onde accessibles et la résolution restent dans les plages physiques de fonctionnement.

## 1.4 Mise à jour du spectrofluorimètre B

### 1.4.1 Éléments nouveaux

#### Raspberry Pi – Installation

Si ce n'est pas déjà fait, procurez-vous une Raspberry Pi accompagnée d'un clavier, d'une souris et disposant d'un nombre suffisant de ports pour y connecter deux Arduino Nano et un ATtiny414.

Il est recommandé d'utiliser un modèle de Raspberry Pi avec au moins 4 ports USB, ainsi que le [clavier officiel Raspberry Pi](#), qui permet d'étendre le nombre de ports disponibles.

Si votre Raspberry Pi est fournie avec un boîtier (recommandé), montez-le, puis installez le système d'exploitation via la carte micro SD incluse ou en utilisant le logiciel Raspberry Pi Imager.

Vérifiez que la version de Python installée est à jour (Python 3) en exécutant la commande suivante dans le terminal : **`python -V`**.

Installez ensuite les bibliothèques nécessaires :

- yaml via : **`pip3 install PyYAML`**

L'installation de l'IDE Arduino sur la Raspberry Pi n'est pas obligatoire, mais vous devrez impérativement téléverser le programme sur vos deux Arduino Uno.

#### Arduino Uno, Shield et Drivers

On utilise un Arduino Uno avec un shield CNC et ses drivers ([ARD-CNC-Kit1](#)).

Le montage suit les instructions de la documentation fournie avec le kit. Veillez à orienter correctement les drivers et à installer les radiateurs sur chacun d'eux.

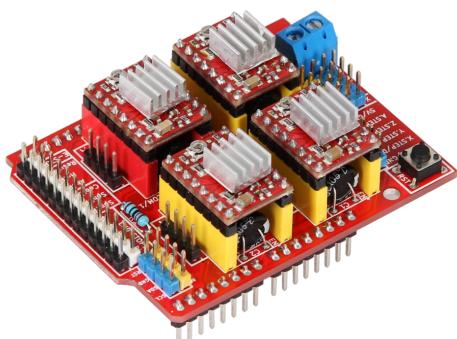


FIGURE 1.8 – Image du shield Arduino avec les 4 drivers du kit CNC



Pour le spectrofluorimètre B, quatre drivers sont nécessaires : un pour le moteur d'orientation du réseau de diffraction et trois pour les moteurs des fentes.

### Alimentation des moteurs

Les moteurs sont alimentés via une source 9 V (ou 12 V, également compatible). Pour le spectrofluorimètre B, une alimentation d'au moins 3 A est requise, contre 1 A pour le modèle A.

Chaque monochromateur nécessite une alimentation indépendante : soit deux alimentations par spectrofluorimètre.

Pour réutiliser les modèles 3D fournis sans modification, privilégier une alimentation avec :

- une prise *barrel jack*,
- deux ports de connexion 5.5 mm × 2.1 mm.



### PCB pour les monochromateurs

Un nouveau PCB est nécessaire pour :

- gérer les capteurs optiques de position,
- contrôler le solénoïde de l'obturateur (shutter) dans le monochromateur d'excitation,
- simplifier le branchement des moteurs pas à pas.

Son [schéma électrique](#), réalisé avec KiCad, est relativement simple. Il comprend :

- l'alimentation des LED infrarouges pour les cinq capteurs optiques,
- un transistor pour le pilotage du solénoïde,
- quatre connecteurs permettant de convertir les connexions moteur de 6 fils (unipolaires) en 4 fils (bipolaires).

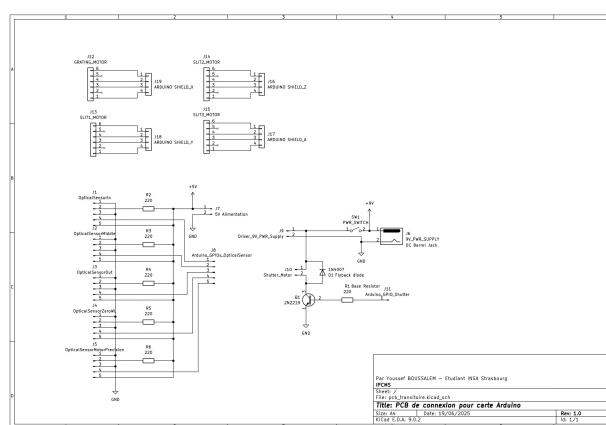
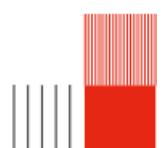


FIGURE 1.11 – Schéma de la PCB des monochromateurs



## Impression 3D

Les pièces suivantes doivent être imprimées pour compléter le montage :

- **SPECB - monochromator - Part 1** (2 exemplaires)
- **SPECB - monochromator - Part 2** (2 exemplaires)
- **SPECB - central unit IN - Part 1** (2 exemplaires)
- **SPECB - central unit IN - Part 2** (2 exemplaires)
- **SPECB - central unit OUT - Part 1** (1 exemplaire)
- **SPECB - central unit OUT - Part 2** (1 exemplaire)

### 1.4.2 Démontage des monochromateurs

#### Déconnexion des câbles

Débrancher tous les câbles coaxiaux et autres connectiques du spectrofluorimètre.

#### Séparation des boîtiers

Desserrer les vis situées sur la partie supérieure afin de séparer les différents compartiments (monochromateurs et chambre principale).

#### Ouverture des monochromateurs

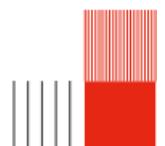
Retirer toutes les vis du couvercle supérieur pour ouvrir les monochromateurs.

Avant toute manipulation interne, il est recommandé :

- de retirer les réseaux de diffraction pour éviter tout dommage (à l'aide de la vis située à l'arrière du réseau),
- de protéger les miroirs à l'aide de petits sachets plastiques.



FIGURE 1.12 – Photo du monochromateur ouvert



### **Retrait de l'ancien PCB**

Commencer par enlever la paroi verticale située devant le PCB à l'aide d'une clé Allen 7/64 pour retirer les deux vis situées au fond du boîtier.



FIGURE 1.13 – Photo de la paroi à enlever

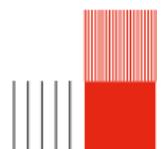
Ensuite, retirer le PCB en utilisant un tournevis cruciforme ainsi qu'un cliquet avec douilles. Débrancher ensuite tous les câbles en tirant délicatement dessus.



FIGURE 1.14 – Photo du PCB

### **Retrait du port de connexion**

Le port de connexion situé sous l'une des fentes doit également être retiré.



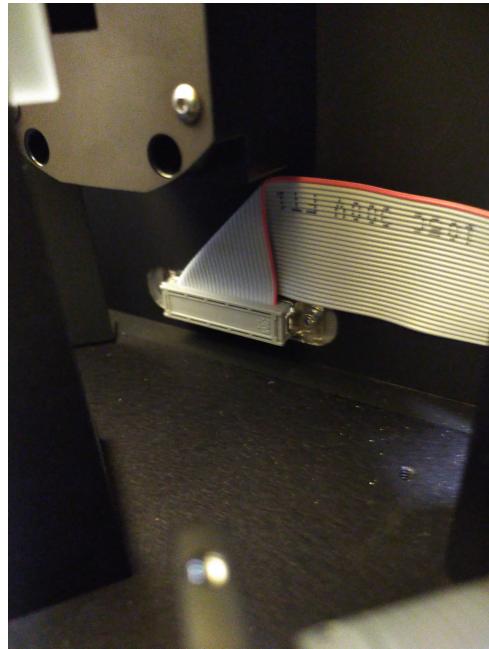


FIGURE 1.15 – Photo du port de connexion

Voici les étapes à suivre :

- Enlever le mur en forme de V situé devant le port à l'aide d'une clé Allen 7/64.
- Utiliser ensuite une clé Allen 3/32 pour retirer les deux vis maintenant le port de connexion en place.

Cette opération peut être délicate à cause de l'espace réduit. Protéger les miroirs à proximité si besoin.

#### Éléments à conserver

Parmi les éléments démontés, conservez :

- les vis du port de connexion,
- les deux parois verticales et leurs vis.

Le reste, notamment le PCB et le port de connexion, ne sera plus utilisé.

#### 1.4.3 Montage des monochromateurs

##### Branchement de l'Arduino et du PCB

Commencer par identifier les différents câbles, puis les connecter comme suit :

- Trois moteurs pas à pas contrôlant les fentes (6 fils chacun), accompagnés de leurs capteurs optiques (3 ou 5 fils).
- Un moteur pas à pas pour l'orientation des réseaux de diffraction, avec deux capteurs optiques :
  - Un capteur de mise à zéro (situé sous la plateforme d'un des réseaux).
  - Un capteur de précision pour améliorer le positionnement du moteur.
- Un solénoïde pour le contrôle du shutter (si présent).

##### Branchement du moteur d'orientation :

- Connecter les deux capteurs optiques au PCB.
- Relier les sorties de signal du PCB au shield Arduino :
  - Le capteur de mise à zéro sur la broche **RESET/ABORT**.
  - Le capteur de précision sur la broche **FEED/HOLD**.
- Connecter le moteur pas à pas au driver **X** du shield Arduino, en utilisant le PCB (conversion 6 fils → 4 fils) ou en sertissant manuellement les câbles.



#### **Branchement des moteurs de fentes :**

- Connecter chaque capteur optique au PCB.
- Relier les signaux comme suit :
  - Fente 1 (au-dessus du port de connexion) → **END STOP Z**.
  - Fente 2 (au centre du boîtier) → **END STOP Y**.
  - Fente 3 (côté opposé au port de connexion) → **RESUME**.
- Connecter les moteurs aux drivers du shield Arduino :
  - Fente 1 → driver **A**,
  - Fente 2 → driver **Z**,
  - Fente 3 → driver **Y**.

Utiliser les connecteurs du PCB ou sertir les câbles si nécessaire.

#### **Branchement du shutter (si présent) :**

- Connecter le solénoïde aux bornes prévues sur le PCB.
- Relier le signal de contrôle du PCB à la broche **END STOP X** du shield Arduino.

Enfin, connecter les lignes **GND**, **9 V ou 12 V**, et **5 V** entre le shield Arduino et le PCB.

Une fois les connexions terminées, replacer la paroi verticale. L'Arduino et le PCB peuvent être insérés dans l'espace disponible. Si besoin, utilisez les trous filetés de l'ancienne PCB pour les fixer solidement.

#### **Connecteur de puissance**

Soudez un connecteur DC *barrel jack* à deux câbles longs, afin de le placer à l'emplacement de l'ancien port de connexion. Connectez l'autre extrémité au PCB (sertissage ou soudure selon le besoin).

#### **Nouveau port de connexion**

Faites passer le câble Arduino et celui de l'alimentation DC dans les pièces 3D **SPECB - mono-chromator - Part 1** et **Part 2**, puis fixez-les à l'aide des vis de l'ancien port de connexion.

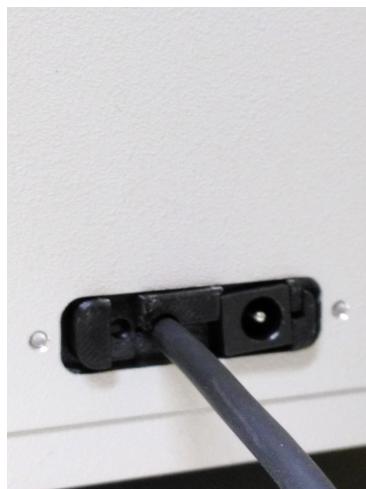
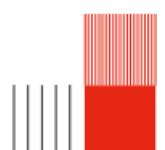


FIGURE 1.16 – Photo du nouveau port de connexion

Ensuite, repositionnez la paroi située devant le port de connexion.



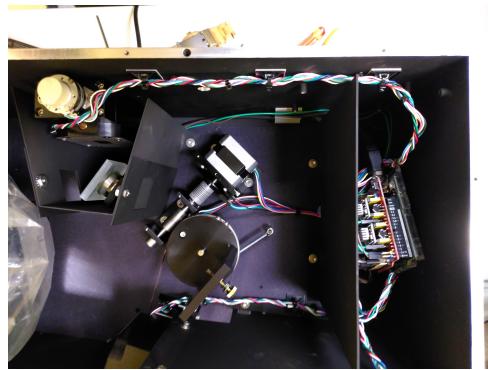


FIGURE 1.17 – Photo de l'intérieur du monochromateur monté

#### 1.4.4 Démontage du boîtier central

Retirer les différentes vis sur la partie supérieure du boîtier, puis l'ouvrir délicatement. Des câbles étant collés sur la paroi supérieure, il est recommandé de les glisser légèrement sans les déconnecter ni les couper.

Dévisser le PCB principal ainsi que le port de connexion qui y est soudé.

Retirer ensuite :

- le PCB,
- les ports de connexion situés sous les deux fentes.



FIGURE 1.18 – Port sous la première fente

FIGURE 1.19 – Port vers ordinateur de contrôle

FIGURE 1.20 – Port sous la deuxième fente

#### 1.4.5 Montage du boîtier central

Une fois le montage des deux monochromateurs terminé, faire passer les câbles Arduino ainsi que les câbles d'alimentation à travers les pièces 3D nommées **SPECB - central unit IN/OUT - Part 1** et **Part 2**.

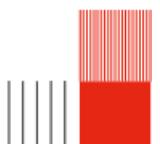
Fixer ces pièces à l'emplacement des anciens ports de connexion. Cela permet :

- de relier les câbles Arduino à la Raspberry Pi,
- d'alimenter chaque monochromateur via les prises électriques.

#### 1.4.6 Configuration et étalonnage

Afin de faire fonctionner correctement le spectrofluorimètre, deux étapes de configuration sont nécessaires :

- Définir le sens de rotation des moteurs.
- Étalonner les monochromateurs.



## Configuration des moteurs

La configuration des moteurs s'effectue par communication série avec l'Arduino Uno. Pour cela, utiliser l'IDE Arduino depuis un ordinateur ou depuis la Raspberry Pi (l'IDE n'est pas installé par défaut).

Les commandes suivantes permettent de tester les moteurs :

- `MOVE,<Nom Du Moteur>, <Nombre de pas>, <Sens de rotation (0 ou 1)>`
- Les noms de moteurs disponibles sont :
  - WL : moteur d'orientation des réseaux de diffraction,
  - SLIT1 : moteur de la fente au-dessus du port de connexion,
  - SLIT2 : moteur de la fente centrale,
  - SLIT3 : moteur de la fente opposée au port de connexion.

Comme les moteurs ont été branchés sans contrainte d'orientation, il faut configurer leur sens de rotation manuellement dans le code Arduino :

- Ouvrir le fichier `config.h` (ligne 2 du fichier principal). Sélectionner le fichier correspondant au type de monochromateur (A ou B).
- Dans la structure `motors[]`, ajuster la vitesse de chaque moteur. Cette vitesse est définie par le temps d'attente entre deux pas :
  - Pour augmenter la vitesse : diminuer le temps d'attente.
  - Pour diminuer la vitesse : augmenter ce temps.

Choisir des vitesses assurant une rotation fluide, sans à-coups.

Cette étape est optionnelle si vos moteurs se comportent exactement comme ceux utilisés dans le projet.

- Modifier l'avant-dernière variable de chaque moteur : `zeroDirection`, à `LOW` ou `HIGH`, de manière à ce que :
  - la longueur d'onde diminue (pour le moteur WL),
  - la fente se ferme (pour les moteurs SLIT) lorsque la commande `MOVE` est utilisée avec le sens de rotation 0.

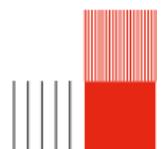
Une fois ces réglages effectués, téléverser le code sur l'Arduino Uno.

## Configuration série et étalonnage

Ouvrir le programme Python, puis localiser le fichier YAML correspondant au spectrofluorimètre B dans le dossier `SYSTEM_CONFIG`.

Effectuer les réglages suivants :

- Modifier le port de connexion de chaque monochromateur selon l'identifiant de votre système : `/dev/ttyUSB<n° du port>` (généralement entre 1 et 4).
- Déterminer les coefficients de la relation entre le nombre de pas et la longueur d'onde :
  - Pour les monochromateurs de type A :  
relation linéaire :  $\lambda = \lambda_0 + \alpha \cdot k_{\text{pas}}$ .
  - Pour les monochromateurs de type B :  
relation non linéaire :  $\lambda = \lambda_0 + \alpha \cdot \sin(\beta \cdot k_{\text{pas}})$ .
- Pour les monochromateurs de type B, déterminer également la relation entre la \*\*résolution spectrale\*\* (en longueur d'onde) et le pas moteur. Cette relation est linéaire, donc deux coefficients suffisent.
- Enfin, ajuster expérimentalement les valeurs de pas `minimum` et `maximum` pour chaque moteur. Cela permet de :
  - garantir la sécurité mécanique,
  - limiter les longueurs d'onde aux plages utiles,
  - obtenir une bonne précision de balayage.



# Bibliographie

- [1] Murty Mantravadi. Theory and principles of monochromators, spectrometers and spectrographs. *Optical Engineering*, 13(1) :23–29, 1974.

