

## RAPPORT DE PROJET MULTIDISCIPLINAIRE

Instrumentation d'un  
monochromateur pour étudier les  
propriétés d'électroluminescence  
et de photoluminescence de semi-  
conducteurs massifs et de  
nanoparticules

Tuteurs :  
Benjamin Lassagne  
Simon Cayez



Laboratoire  
de Physique & Chimie  
des Nano-Objets

WOLF Anicka  
LAVIE-RICHARD Nicolas

Promotion 57, 4A GP  
Année 2022-2023  
INSA Toulouse

135 Avenue de  
Rangueil  
31400 Toulouse

Soutenance le 31 mai 2023

# **RAPPORT DE PROJET MULTIDISCIPLINAIRE**

Instrumentation d'un  
monochromateur pour étudier les  
propriétés d'électroluminescence  
et de photoluminescence de semi-  
conducteurs massifs et de  
nanoparticules

WOLF Anicka  
LAVIE-RICHARD Nicolas

Promotion 57, 4A GP  
Année 2022-2023  
INSA Toulouse

Tuteurs :  
Benjamin Lassagne  
Simon Cayez

135 Avenue de  
Rangueil  
31400 Toulouse

Soutenance le 31 mai 2023



Laboratoire  
de Physique & Chimie  
des Nano-Objets



## **Remerciements**

Nous souhaitons remercier toutes les personnes qui ont pu nous aider à réaliser ce projet multidisciplinaire. Nous remercions M. Pierre pour son aide pour le code python, Mme Crouzet et Mme Reyjal pour leur aide à la réalisation des bancs optiques et électriques, M. Houdellier pour ses explications en optique et M. Balocchi pour la réalisation de l'expérience de photoluminescence. Enfin, nous souhaitons remercier tout particulièrement nos deux tuteurs M. Lassagne et M. Cayez pour leur aide précieuse et leur réactivité, permettant de mener ce projet à bien.

# Sommaire

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>I. OBJECTIFS ET CONTEXTE DU PROJET .....</b>	<b>2</b>
A. CONTEXTE DU PROJET .....	2
B. OBJECTIFS .....	2
C. LIVRABLES.....	2
D. CONTENU DES PRODUITS .....	2
<b>II. DESCRIPTION DES BANCS DE TEST.....</b>	<b>4</b>
A. ÉLÉMENTS DES BANCS DE TEST .....	4
i. <i>Le monochromateur TMc300.....</i>	<i>4</i>
ii. <i>Principe de fonctionnement de la détection synchrone SR 830.....</i>	<i>4</i>
B. EXPERIENCE D'ELECTROLUMINESCENCE .....	6
C. EXPERIENCE DE PHOTOLUMINESCENCE .....	8
<b>III. TRAVAIL REALISE .....</b>	<b>12</b>
A. CODE DU PROGRAMME .....	12
B. TRAVAIL PRATIQUE ET EXPERIMENTAL .....	17
i. <i>Réalisation des expériences d'électroluminescence .....</i>	<i>17</i>
ii. <i>Réalisation des expériences de photoluminescence .....</i>	<i>19</i>
<b>IV. RESULTATS ET ELEMENTS D'AMELIORATION.....</b>	<b>21</b>
A. RESULTATS EXPERIMENTAUX .....	21
B. PISTES D'AMELIORATIONS .....	22
i. <i>Éléments du code.....</i>	<i>22</i>
ii. <i>Dispositif expérimental .....</i>	<i>23</i>
<b>V. CONCLUSION.....</b>	<b>25</b>
<b>VI. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>26</b>
<b>VII. TABLE DES ILLUSTRATIONS.....</b>	<b>27</b>
<b>VIII. ANNEXE .....</b>	<b>28</b>

# Introduction

Les analyses de spectres en science sont multiples et permettent d'acquérir de manière non destructive des informations importantes sur la nature du milieu étudié. Il est par exemple possible de déterminer sur un matériau semi-conducteur l'amplitude de sa bande en énergie interdite (gap), ou de détecter si des traces de vie sont présentes sur une planète en déterminant par exemple les constituants de son atmosphère. Dans le cadre des Travaux Pratiques (TP) de quatrième année les élèves sont invités à faire plusieurs expériences autour de l'analyse de spectres de semi-conducteurs. Il s'agit d'analyser l'absorption de matériaux, de caractériser les propriétés d'électroluminescence des matériaux et de se familiariser avec l'utilisation et le fonctionnement d'un monochromateur. En particulier, le TP d'électroluminescence invite à analyser les spectres de différentes diodes à différentes températures. Il permet d'en déduire l'influence de la température sur les propriétés des semi-conducteurs utilisés dans ces diodes. Aspirant à faire évoluer ce TP, autant sur l'aspect technique que son contenu, M. Lassagne en a fait un projet multidisciplinaire qui nous a été confié cette année. Le projet multidisciplinaire est un projet réalisé en binôme durant le cursus du Génie Physique en quatrième année. Ce projet est attribué par des personnes internes ou externes au département, des industriel·le·s ou chercheur·se·s.

# **I. Objectifs et contexte du projet**

## **A.Contexte du projet**

Nous avons réalisé notre projet multidisciplinaire en collaboration avec le LPCNO au Génie Physique à l'INSA Toulouse. Notre projet nous amène à travailler sur un des TP adressés aux étudiants de quatrièmes années de Génie Physique. En effet, le TP4 Électroluminescence et propriétés optiques des semi-conducteurs utilise un monochromateur ancien restreint aux longueurs d'onde du visible et couplé à un moteur peu précis que l'équipe enseignante change pour la rentrée 2023.

## **B.Objectifs**

Nous devons remplacer l'ancien monochromateur du TP4 par le nouveau monochromateur, le TMc300 de Bentham Instruments, bien plus précis et que l'on peut instrumenter afin que les étudiants puissent faire une acquisition de données fiables.

Le TMc300 est muni d'un moteur automatisé qui permet de sélectionner des longueurs d'ondes par rotation des réseaux.

Notre principal objectif est d'instrumenter le TMc300 et la détection synchrone SR830 permettant d'acquérir les spectres de différents objets. Pour se faire nous devons réaliser une interface graphique et un programme.

Notre objectif secondaire au début du projet était de réaliser la mesure de rendement d'une diode, pour ajouter cette expérience au TP. Finalement, cet objectif a évolué au cours de notre travail et a été redéfini de la façon suivante : nous devons effectuer des mesures de spectre d'électroluminescence de différentes diodes et faire des mesures de spectres de photoluminescence de semi-conducteurs.

## **C.Livrables**

Un code commenté et une interface graphique pilotant la mesure de spectre. Une documentation pour utiliser l'interface graphique.

## **D.Contenu des produits**

Le programme d'instrumentation doit être capable de :

- Entrer en communication avec la détection synchrone
- Relever les valeurs reçues par la détection synchrone
- Entrer en communication avec le monochromateur
- Demander au monochromateur de se positionner à une longueur d'onde donnée
- Automatiser la mesure de spectre pour une plage de longueur d'onde donnée par l'utilisateur ou utilisatrice
- Pouvoir arrêter la mesure si un problème apparaît ou par décision de l'utilisateur ou utilisatrice
- Choisir les paramètres pour la mesure de température
- Permettre de mesurer la température
- Afficher des données dans des graphiques

- Enregistrer les valeurs de la mesure complète dans un fichier
- Effacer les données relevées et effacer les graphiques en fin de mesure
- Enregistrer un fichier temporaire des mesures

Le livret de documentation doit contenir des explications sur les différents éléments de l'interface graphique et des conseils pour utiliser au mieux le programme.



## II. Description des bancs de test

### A.Éléments des bancs de test

#### i. Le monochromateur TMc300

C'est un des deux appareils centraux et indispensables du banc de test. Un monochromateur permet, de filtrer en sortie les longueurs d'onde d'une source donnée, permettant ainsi d'analyser l'intensité de chaque longueur d'onde et au final la source lumineuse en entier en balayant sur une large plage de longueur d'onde.

Il est schématisé<sup>1</sup> de la manière suivante :

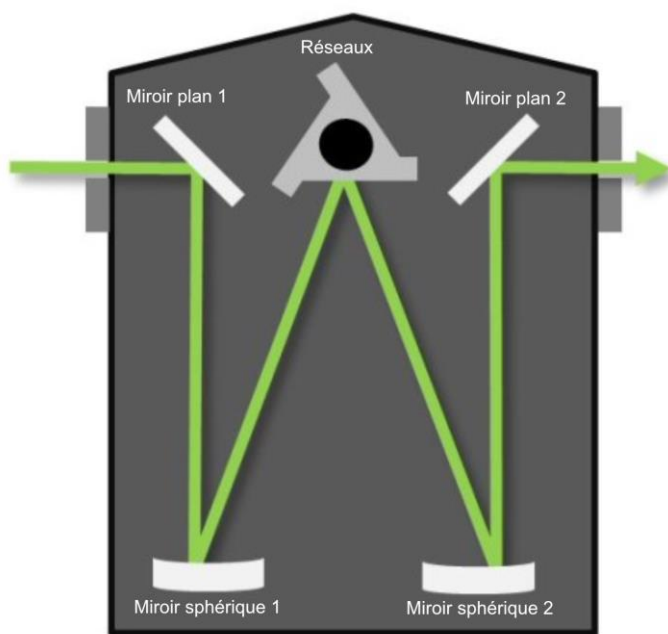


Figure 1. Schéma monochromateur TMc300

La lumière suit le trajet de la flèche verte. Après avoir été réfléchi par les deux premiers miroirs elle arrive sur la tour de réseaux. Le miroir sphérique 1 permet au faisceau d'arriver sur l'entièreté du réseau utilisé afin de maximiser la lumière en sortie. Cette lumière est diffractée par le réseau et seule la longueur d'onde sélectionnée va sur le miroir sphérique 2. Le miroir sphérique 2 et le miroir plan 2 permettent de renvoyer la lumière correctement via la sortie.

Le modèle choisi par Benjamin Lassagne a deux réseaux permettant de couvrir une plage de longueurs d'onde allant de 300 à 2500nm. Le choix du réseau adapté pour la longueur d'onde est fait automatiquement par l'électronique intégrée du monochromateur. À cela s'ajoute deux

filtres, un pour chaque réseau, permettant de filtrer les ordres de diffraction qui perturberaient la mesure.

#### ii. Principe de fonctionnement de la détection synchrone SR 830

La détection synchrone est le deuxième appareil central du banc de mesure. Elle permet de faire la mesure à proprement parler. En effet, le monochromateur ne permet que de sélectionner une longueur d'onde qu'il faut ensuite capter et dont il faut mesurer l'intensité. La détection synchrone est donc connectée à une photodiode. Ensuite, il revient à la détection synchrone d'extraire le signal intéressant du bruit. En effet, cet appareil permet de différencier très finement le bruit du signal d'intérêt ce qui est d'autant plus important que dans notre cas le signal est souvent faible par rapport au bruit. Son fonctionnement se base sur la modulation du signal d'entrée. Cette modulation du signal

<sup>1</sup> BENTHAM INSTRUMENTS LTD. *Datasheet TMc300*. [en ligne]. Disponible sur : [https://www.bentham.co.uk/fileadmin/uploads/bentham/Components/Monochromators/Configurable%20Monochromators/TMc300/Data-Sheet\\_TMc300.pdf](https://www.bentham.co.uk/fileadmin/uploads/bentham/Components/Monochromators/Configurable%20Monochromators/TMc300/Data-Sheet_TMc300.pdf)

d'entrée se retrouve dans le signal de sortie qu'il faut donc démoduler pour extraire la partie significative et d'intérêt pour la mesure.

Voici de manière simplifiée les étapes permettant de réaliser ces opérations.

Avant modulation nous avons le signal suivant :

$$S = S_1$$

Vient ensuite l'étape de modulation avec la fréquence choisie.

$$S = S_1 \cos(\omega_1 t)$$

À cela se rajoute un signal parasite et une phase :

$$S = S_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1) + S_2 \cos(\omega_2 t + \theta_2)$$

C'est le signal récupéré par la détection synchrone. Il faut alors démoduler le signal pour récupérer  $S_1$ .

On peut démoduler de deux manières, avec  $\cos(\omega_1 t)$  :

$$S = (S_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1) + S_2 \cos(\omega_2 t + \theta_2)) \cos(\omega_1 t)$$

$$S = \frac{S_1 \cos(\theta_1)}{2} + \frac{S_1 \cos(\theta_1 + 2\omega_1 t)}{2} + \frac{S_2}{2} [\cos((\omega_2 - \omega_1)t + \theta_2) + \cos((\omega_2 + \omega_1)t + \theta_2)]$$

En appliquant un filtre passe-bas coupant les fréquences tel que  $\omega_c < 2\omega_1$  ou  $\omega_c < 2(\omega_2 - \omega_1)$  on arrive à :

$$\frac{X}{2} = \frac{S_1 \cos(\theta_1)}{2}$$

En démodulant avec  $\sin(\omega_1 t)$  :

$$S = (S_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1) + S_2 \cos(\omega_2 t + \theta_2)) \sin(\omega_1 t)$$

$$= (S_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1) + S_2 \cos(\omega_2 t + \theta_2)) \cos\left(\omega_1 t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$S = \frac{S_1 \cos\left(\theta_1 + \frac{\pi}{2}\right)}{2} + \frac{S_1 \cos\left(\theta_1 - \frac{\pi}{2} + 2\omega_1 t\right)}{2} + \frac{S_2}{2} \left[ \cos\left((\omega_2 - \omega_1)t + \theta_2 + \frac{\pi}{2}\right) + \cos\left((\omega_2 + \omega_1)t + \theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) \right]$$

De même, filtration avec  $\omega_c < 2\omega_1$  ou  $\omega_c < 2(\omega_2 - \omega_1)$  :

$$\frac{-Y}{2} = \frac{S_1 \cos\left(\theta_1 + \frac{\pi}{2}\right)}{2} = \frac{-S_1 \sin(\theta_1)}{2}$$

Ainsi, on déduit la valeur de R et  $\theta_1$  :

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

$$\tan(\theta_1) = \frac{Y}{X}$$

Ainsi, on arrive à la fin à un signal utile avec très peu de bruit. C'est très efficace car on peut faire des mesures de spectres en plein jour sans que cette lumière vienne perturber la mesure.

La fréquence de coupure du filtre passe-bas est déterminée par la constante de temps. Il faut donc bien choisir cette constante de temps, réglable directement sur l'appareil, afin de couper la fréquence de modulation. Si on ne la coupe pas, le signal utile sera noyé dans la modulation et il sera inexploitable.

## B. Expérience d'électroluminescence

L'électroluminescence est le principe de générer de la lumière par excitation électrique. Ici nous alimentons des diodes pour étudier leur spectre. Une diode électroluminescente (DEL ou LED en anglais) est réalisée à partir d'une jonction PN, son fonctionnement est expliqué par la physique des semiconducteurs. Dans la bande de valence les porteurs minoritaires sont les trous, une charge positive fictive qui décrit l'absence d'électron. La bande de conduction est séparée de la bande de valence par une énergie  $\Delta E$  correspondant à la bande interdite, aussi appelée l'énergie de gap (voir Figure 2). Les électrons sont les porteurs minoritaires de la bande de conduction. Un apport d'énergie sous forme de courant ou de lumière permet de faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction, on dit que les électrons sont excités vers des niveaux d'énergies supérieurs. Cet apport doit être supérieur à  $\Delta E$ . Les électrons, une fois dans la bande de conduction, vont se désexciter afin de retourner dans un état stable à un niveau d'énergie plus faible en bande de valence et se recombiner avec un trou. La transition d'un état haut vers un état bas se fait en émettant une radiation lumineuse, il s'agit de la recombinaison radiative. Dans le cas d'une LED le courant circulant dans le sens passant de la diode va injecter dans la jonction PN un surplus de porteurs, des électrons, ce qui entraîne un grand nombre de recombinaisons radiatives et permet à la diode d'émettre de la lumière, il s'agit du phénomène d'électroluminescence.

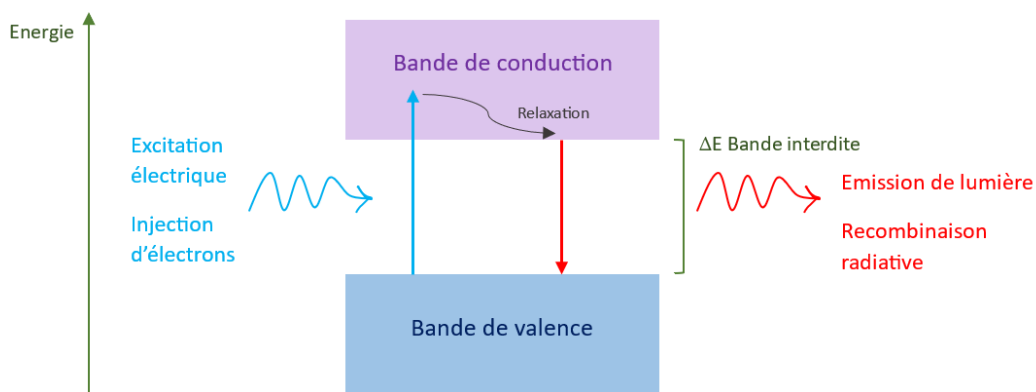


Figure 2. Schématisation du phénomène d'électroluminescence

Voici le schéma électrique de l'expérience :

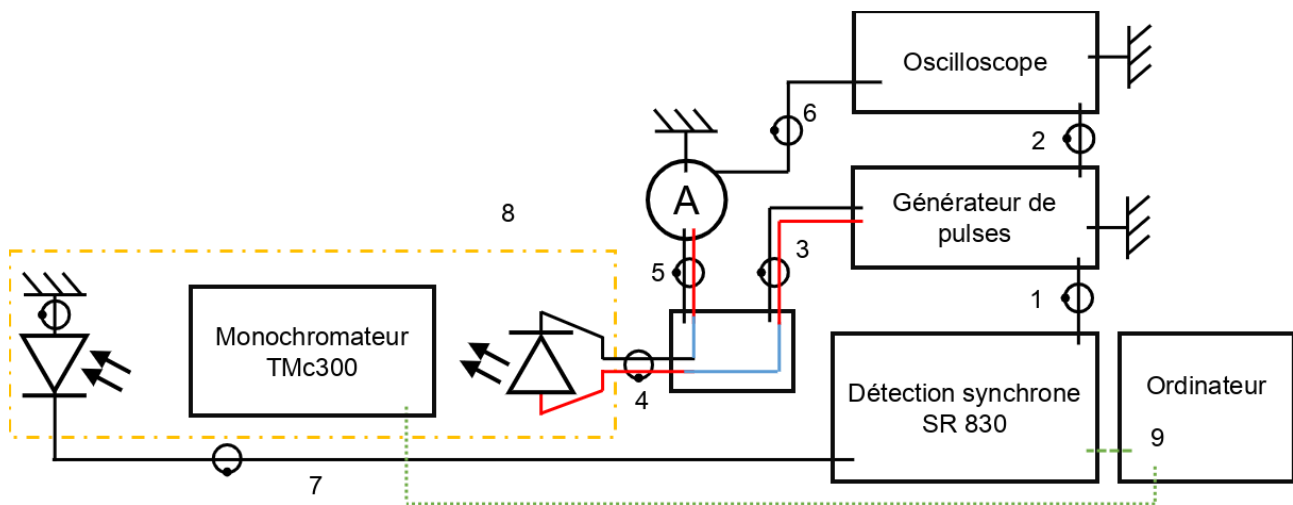


Figure 3. Schéma du banc de test électrique d'électroluminescence.

Légende et explications :



LED, objet étudié.



Photodiode, détecteur de la lumière.



Câble coaxial, câble double, avec un câble central, l'âme, où le signal circule isolé par un blindage extérieur assuré par la tresse.



Indique que l'appareil est relié à la masse.

1. La détection synchrone impose sa fréquence au générateur de pulses. Ce dernier comme son nom l'indique génère à une fréquence donnée une valeur réglable de tension durant un temps donné.
2. Le générateur de pulses est directement relié à l'oscilloscope afin que l'on puisse observer le pulse que l'on envoie à la diode. Ce pulse a la forme d'un signal carré.
3. La sortie du générateur de pulses est aussi reliée à la photodiode par l'intermédiaire d'un boîtier. Ce boîtier permet de mettre en série la LED avec un ampèremètre.
4. En effet, ce câble coaxial est utilisé comme câble double et non câble simple avec blindage. Le signal arrive via l'âme du câble du générateur de pulses, tel que cela le ferait normalement. Cependant, le câble connecté à la LED est divisé en deux en son bout et permet d'utiliser la tresse de blindage comme sortie de la LED (voir Figure 4).

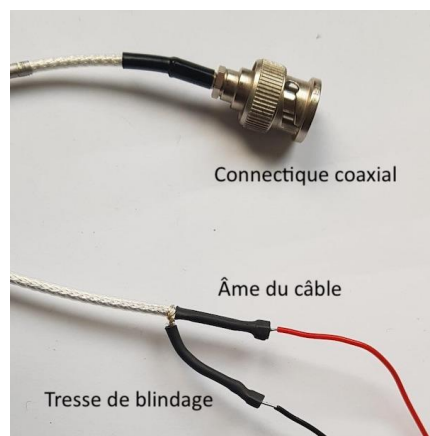


Figure 4. Câble coaxial séparé en deux à son bout, permettant de l'utiliser comme câble double.

5. Ainsi, la tresse de blindage du câble connecté à la LED est reliée via le boîtier à l'âme du câble de l'ampèremètre, le mettant ainsi en série dans le circuit. Le circuit est fermé grâce à la connexion à la masse des différents appareils. En effet, l'ampèremètre que l'on utilise est relié directement au réseau électrique.
6. Il envoie sa mesure via un câble coaxial que l'on a connecté à l'oscilloscope. Il est essentiel que l'on puisse mesurer le courant dans le circuit car la LED pourrait être détériorée par l'application d'un courant trop important. Comme on ne connaît pas son spectre d'émission et qu'il est possible qu'il ne soit pas dans le visible, on règle la valeur de la tension délivrée par le générateur de pulses en fonction de la réponse en courant de la diode. Afin de bien régler cela, dès que la valeur de courant dépasse quelques mA on arrête de monter la tension d'entrée, la LED émet.
7. La photodiode est reliée à l'entrée de la détection synchrone. On sélectionne le mode courant de l'entrée, en effet, l'intensité reçue de la photodiode est linéaire avec le courant.
8. Le banc optique de l'expérience, détaillé dans la Figure 5.

9. La détection synchrone et le monochromateur sont reliés à l'ordinateur respectivement en RS232 et USB. Ces deux appareils sont pilotés par le programme que nous avons réalisé sur l'ordinateur.

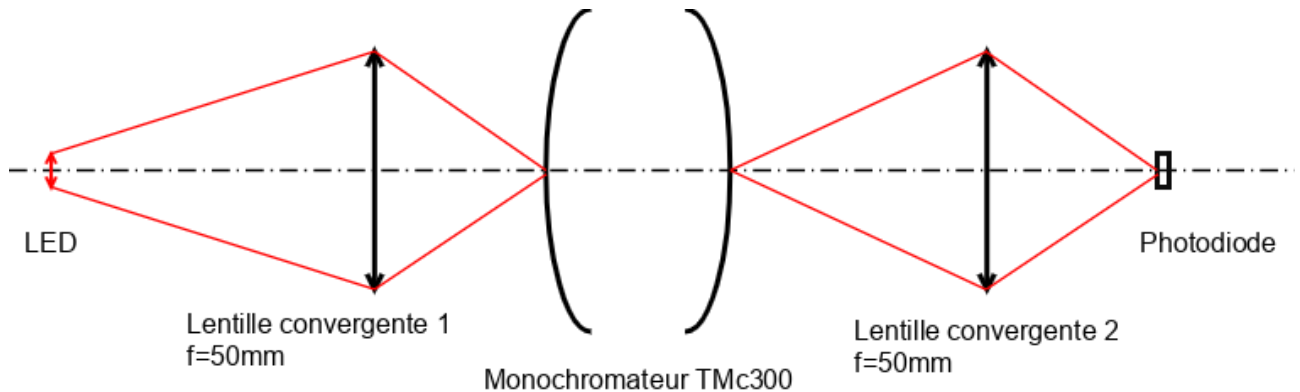


Figure 5. Schéma du banc de test optique pour l'expérience d'électroluminescence.

Le banc de test est simple, seule deux lentilles convergentes permettent de réaliser correctement la mesure de spectre. L'ensemble des éléments sont montés sur un rail optique afin d'être bien alignés. Les lentilles convergentes sont placées tel que le point de focalisation se trouve sur la fente d'entrée du monochromateur pour la première, et sur la photodiode pour la deuxième. L'alignement n'a pas besoin d'être très précis contrairement à l'expérience de photoluminescence, le signal émis par la LED étant très important.

## C. Expérience de photoluminescence

La photoluminescence est le principe de générer une émission de lumière par excitation d'un échantillon avec de la lumière. Un électron peut être excité par photo-excitation (voir Figure 6<sup>2</sup>), en étant soumis à la projection d'un faisceau LASER par exemple. En effet, les électrons peuvent monter dans la bande de conduction où la densité d'états libres est supérieure à celle de la bande de valence

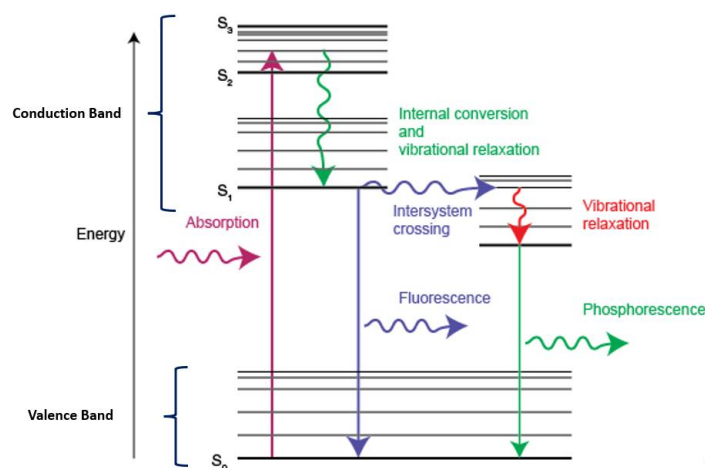


Figure 6. Diagramme énergétique montrant l'absorption de la lumière et les processus impliqués dans l'émission de lumière sous forme de fluorescence et de phosphorescence.

<sup>2</sup> PLC, Renishaw, [sans date]. Renishaw: Photoluminescence. Renishaw [en ligne]. [Consulté le 18 Mai 2023]. Disponible à l'adresse : <http://www.renishaw.com/en/photoluminescence-explained--25809>

en absorbant les photons d'un faisceau lumineux dont l'énergie est au moins égale à celle de la bande interdite.

Toutefois, l'électron ne peut pas rester dans la bande de conduction car il est moins stable que dans la bande de valence. Il doit donc retourner dans son état stable par recombinaison radiative comme vu page 6. Différentes manières permettent à un électron de redescendre en énergie dans son état stable, détaillées en Figure 6. Selon les étapes survenues avant l'émission de ce photon on détectera un pic d'intensité dû à un phénomène de fluorescence ou de phosphorescence.

Pour réaliser des mesures de photoluminescence nous avons fait un montage électrique spécifique présenté dans le schéma ci-dessous :

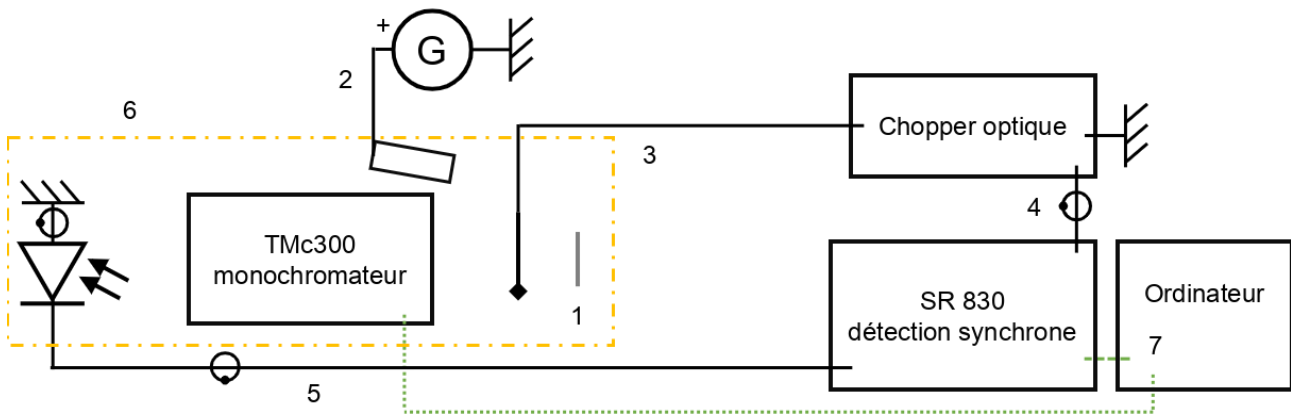


Figure 7. Schéma du banc de test électrique de photoluminescence.

Légende et explications :

1. L'échantillon n'est plus alimenté par du courant mais illuminé par un LASER (voir Figure 9).
2. Le LASER est quant à lui directement relié à un générateur qui lui délivre 5V en continu.



3. Le Chopper optique, visible en Figure 8, est un dispositif qui permet d'imposer une fréquence à une source lumineuse. Le cercle en métal troué tourne à une certaine vitesse que l'on peut changer et impose ainsi la fréquence d'un signal carré. Ici le LASER n'a pas de fréquence de pulse contrairement à l'expérience d'électroluminescence. Ici il impose la fréquence à la lumière du LASER et permet donc d'être utilisé avec la détection synchrone. Le Chopper optique impose sa fréquence à la détection synchrone. La détection synchrone va donc moduler le signal à cette fréquence.

Figure 8. Chopper optique. 4. Idem que pour l'expérience d'électroluminescence, la photodiode est reliée à l'entrée de la détection synchrone et celle-ci analyse le courant de la photodiode.

5. Le banc optique de l'expérience, détaillé dans la Figure 9.
6. Idem que pour l'expérience d'électroluminescence, la détection synchrone et le monochromateur sont reliés à l'ordinateur respectivement en RS232 et USB, c'est bien le même programme qui les pilote car il s'agit toujours d'une analyse de spectre.

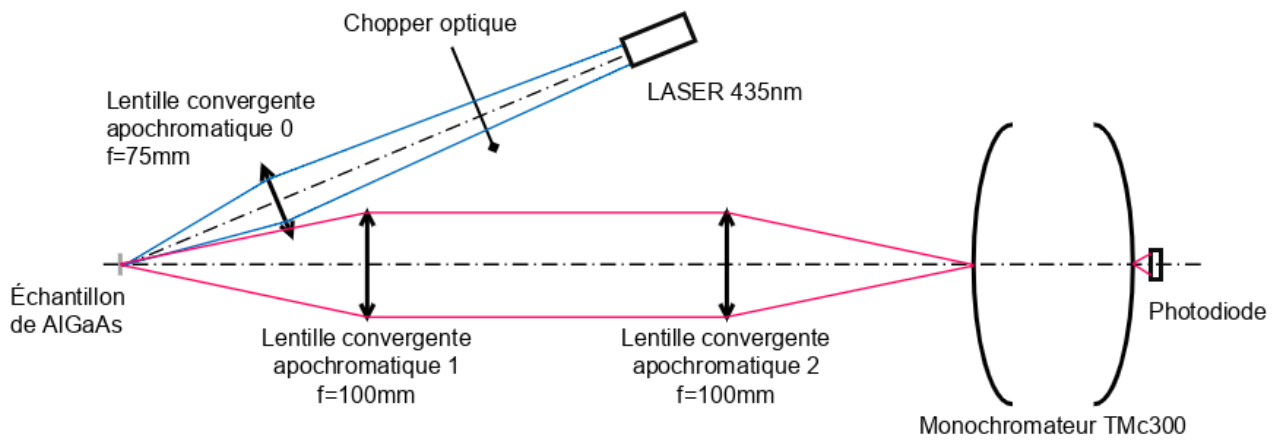


Figure 9. Schéma du banc optique de photoluminescence.

La mise en place du banc de test optique est quant à elle beaucoup plus complexe que pour l'électroluminescence. En effet, comme mentionné précédemment, l'intensité émise par l'échantillon éclairé par le LASER est très faible comparée à la puissance du LASER et c'est donc plus difficile de capter ce signal. Cela nécessite un alignement optique très minutieux du banc d'optique.

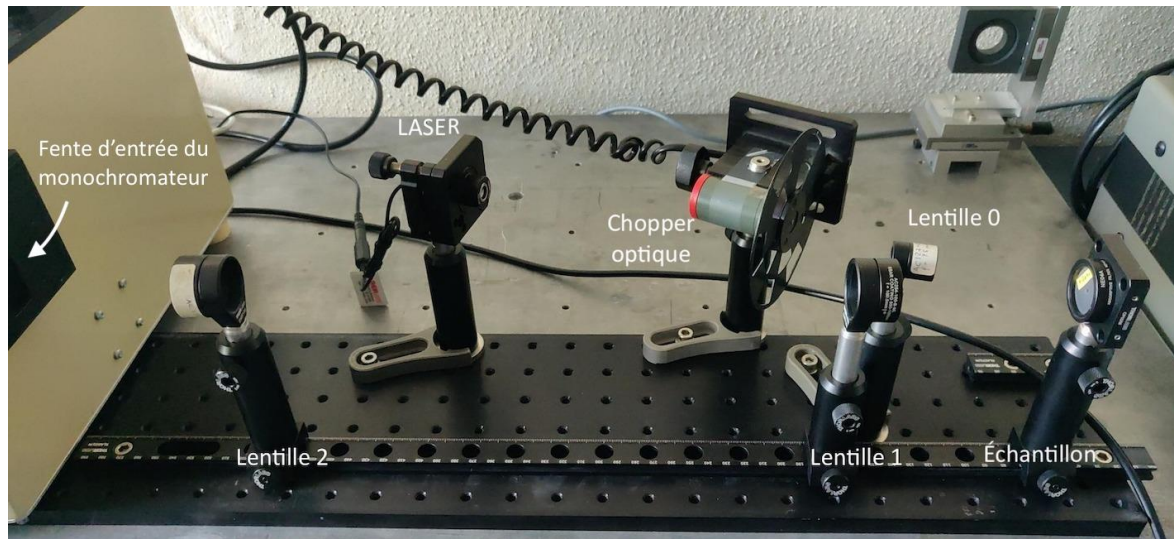


Figure 10. Photo de la première partie du banc optique de photoluminescence.

Comme montré dans les Figures 9 et 10, la lumière ne suit plus une trajectoire rectiligne car le LASER doit être placé à la normale de la surface de l'échantillon afin d'avoir la meilleure réflexion possible. Le chopper optique intervient à ce moment permettant d'utiliser les capacités de la détection synchrone. La lumière est ensuite focalisée par la lentille convergente apochromatique 0 de la Figure 9.

Une lentille apochromatique est une lentille corrigée des aberrations chromatiques, permettant ainsi aux trois longueurs d'onde du bleu, vert et rouge d'avoir un écart de point focal sur l'axe optique très faible.



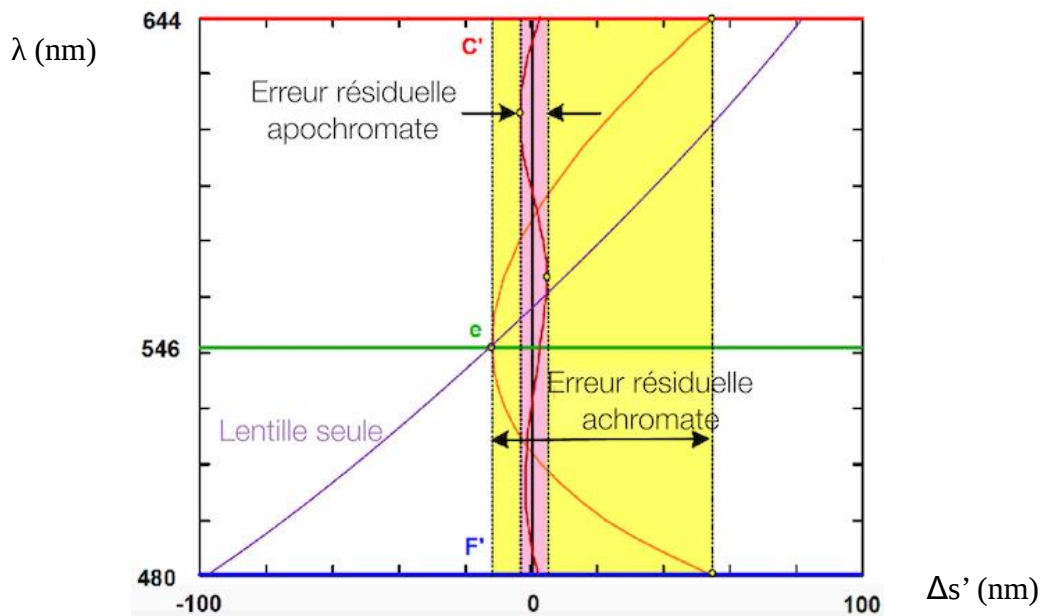


Figure 11. Erreur résiduelle de lentilles simple, achromate et apochromate.

La Figure 11<sup>3</sup> montre en abscisse l'erreur de focalisation sur l'axe optique par rapport à la longueur d'onde en ordonnée. Suivant la longueur d'onde on voit que la lentille seule, type de lentille que l'on utilisait pour l'expérience d'électroluminescence, a un delta de focus très important, d'environ 190 nm comparé aux 10 de l'apochromatique. Avoir moins d'erreur sur ce focus permet d'éviter de perdre du signal, élément crucial dans notre cas. En effet, même si on peut considérer grossièrement le LASER comme ayant une seule longueur d'onde d'émission, à cela vient s'ajouter l'émission de l'échantillon dont on ne connaît pas la longueur d'onde. Comme cette émission est très faible par rapport à la lumière du LASER on peut uniquement faire le focus sur la lumière émise par le LASER. Ainsi pour avoir une mise au point à la fois pour le LASER et la photoluminescence, il est préférable d'avoir des lentilles apochromatiques.

Une fois la lumière du LASER sur l'échantillon, celui-ci émet dans toutes les directions et il faut pouvoir capter un maximum d'intensité. La lentille 1 vient capter cette lumière. Elle est placée de telle manière que l'échantillon est dans son plan focal objet. Ainsi, comme indiqué sur la Figure 9 la lentille 1 renvoie la lumière à l'infini. Cette lumière est captée par la lentille 2 et focalisée sur la fente d'entrée du monochromateur. Comme la lumière de la lentille 1 arrive à l'infini sur la lentille 2, cette dernière focalise les rayons en son point focal image. Ce dispositif de doubles lentilles permet de faciliter les réglages optiques. L'utilisateur doit uniquement régler le positionnement de l'échantillon par rapport à la lentille 1 et le positionnement de la lentille 2 par rapport au monochromateur au lieu de régler le positionnement d'une lentille à la fois par rapport à l'échantillon et au monochromateur. En effet, la distance entre les deux lentilles 1 et 2 n'a pas d'importance car la lumière est à l'infini. C'est donc ce paramètre qui permet l'ajustement de tout le banc. Enfin, on a simplement positionné la photodiode collée à la sortie du monochromateur afin de récupérer toute la lumière en sortant, n'ayant pas besoin d'une lentille de plus pour que cela fonctionne.

Afin de réaliser ce montage nous avons suivi un protocole particulier détaillé page 19.

<sup>3</sup> FLORENT HOUELLIER, CNRS. 2022. *Cours d'optique géométrique*.



### III. Travail réalisé

#### A. Code du programme

La majeure partie de notre travail durant ce projet multidisciplinaire a été de coder le programme python relié avec l'interface graphique afin d'instrumenter le monochromateur et la détection synchrone.

Nous allons donc vous présenter le code du programme lié à l'Interface Utilisateur·trice (IU) visible en Figure 12, dont les différents éléments graphiques et leur rôle sont expliqués dans le manuel d'utilisation en Annexe A.

Voici la liste des différents logiciels et de leurs versions que nous avons utilisés afin de créer notre programme :

- Python 3.9.15
- La librairie PyQt5 5.15.7 pour réaliser les graphiques et le lien avec l'interface utilisateur.
- numpy 1.23.4 pour stocker les données mesurées.
- Pyserial 3.5 pour communiquer via RS232 avec la détection synchrone.
- L'environnement de développement intégré (IDE) Spyder 5.4.3
- Qt designer 5.9.6 afin de réaliser l'interface graphique.

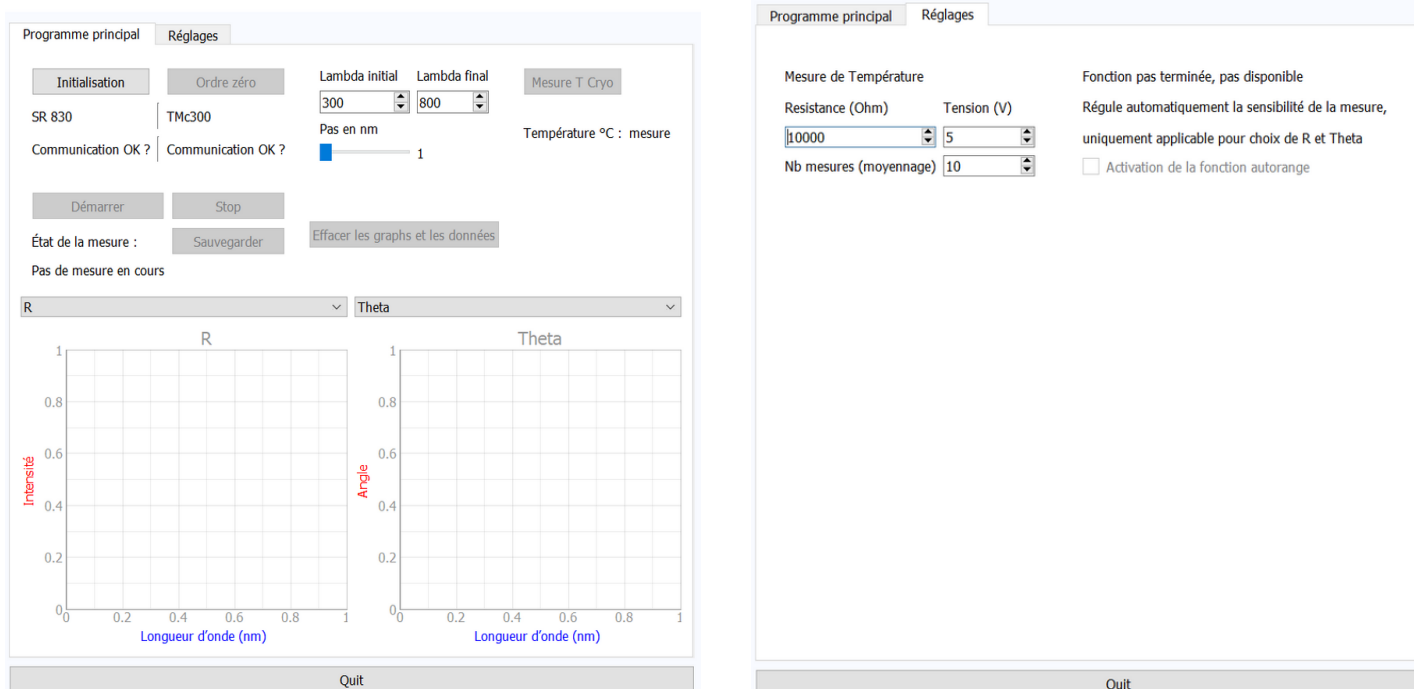


Figure 12. Captures d'écran de l'IU à l'ouverture du programme dans l'onglet « Programme principal » et l'onglet « Réglages » pour la mesure de Température.

Enfin, pour instrumenter le monochromateur TMC300 nous avons utilisé la librairie PyBen 1.0.3 qui fait appel à la DLL Benhw64.dll fournie par le constructeur du monochromateur. Une Dynamic-Link Library (DLL) est un exécutable pouvant être utilisé par différents acteurs. Ainsi, à partir du même fichier on peut créer un code python l'utilisant, ou un code C ou autre toujours avec ce fichier-là. Il permet, dans notre cas, de faire le lien entre l'environnement de l'ordinateur et ce que comprend le monochromateur.

Afin de présenter la structure du code nous avons réalisé les algorithmes des pages suivantes. Dans les algorithmes nous désignons la détection synchrone par son nom de modèle « SR830 », de même pour le monochromateur nous le nommerons « TMc300 ».

Seules les trois fonctions principales du programme sont présentées en algorithmes, l'ordre de présentation des algorithmes est l'ordre logique d'exécution lors de l'utilisation du programme. Cet ordre suit celui utilisé dans le manuel d'utilisation. À la suite des logigrammes nous présentons d'autres fonctions importantes du programme.

Avant de débiter une mesure de spectre, on doit procéder à une initialisation qui permet de rentrer en communication avec les appareils. On la réalise en appuyant sur le bouton « Initialisation ». Cette fonction est détaillée en Figure 13.

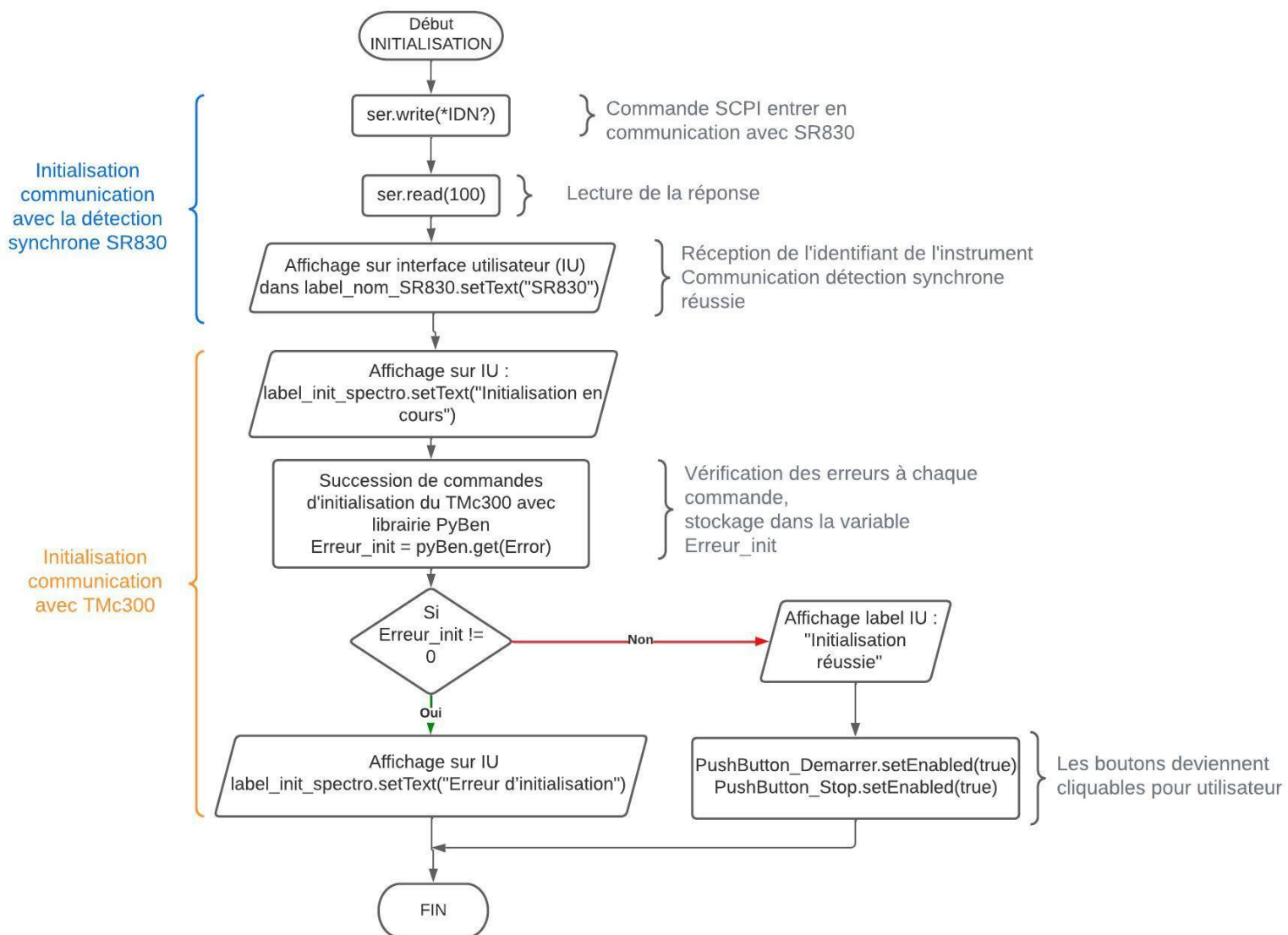


Figure 13. Algorithme de la fonction Initialisation.

Une fois l'initialisation terminée l'utilisateur·trice peut commencer les mesures et cliquer sur le bouton démarrer, dont l'algorithme de la fonction se trouve ci-dessous en Figure 14.

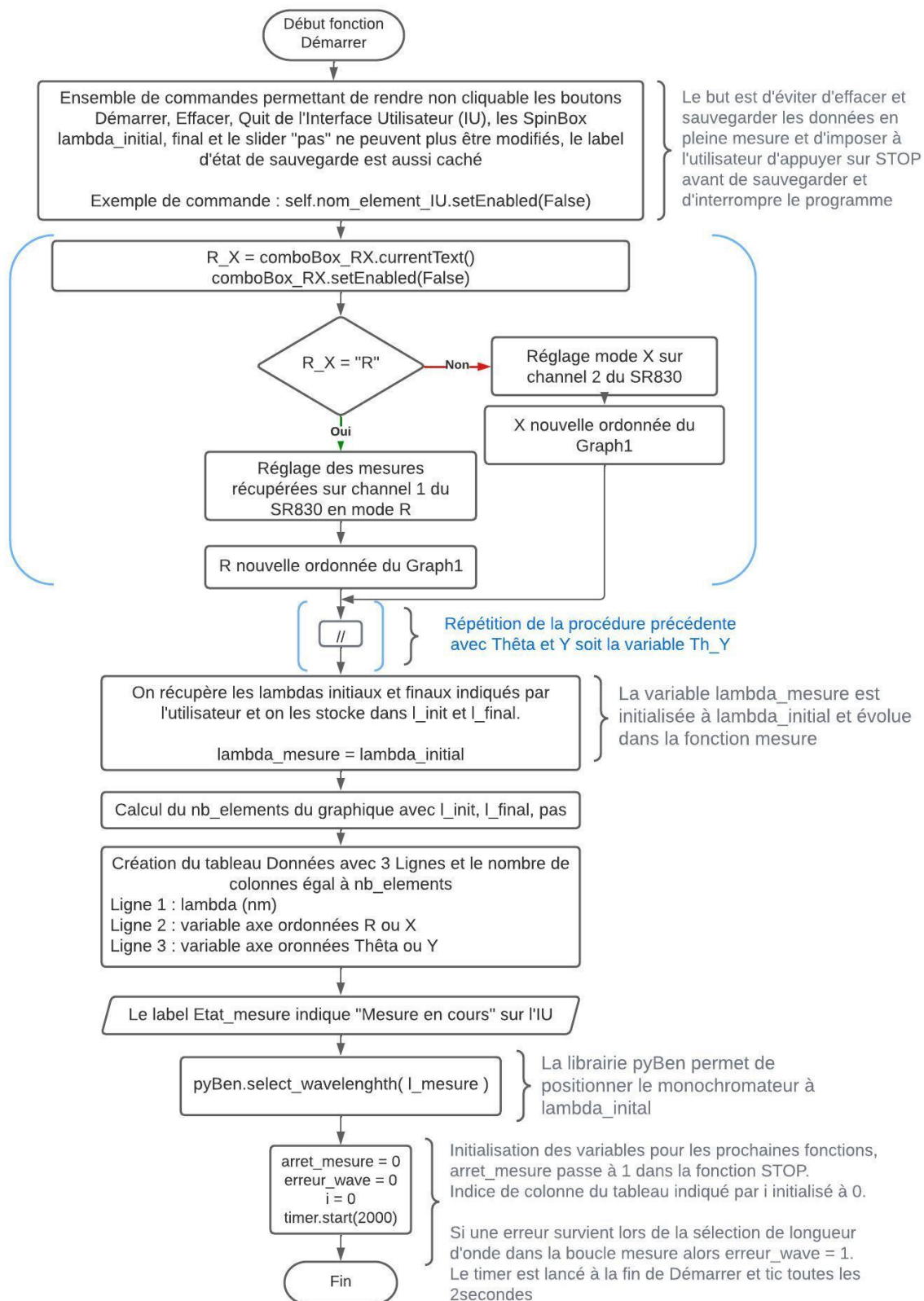


Figure 14. Algorithme de la fonction Démarrer.

Une fois que la fonction Démarrer est terminée, elle a activé l'horloge et donc lance l'exécution de la fonction Mesures (Figure 15). En effet, la fonction mesure s'exécute à chaque tic

d'horloge. Elle permet de stocker les données de l'acquisition de spectre dans un tableau et de les tracer dans les graphiques de l'interface utilisateur. L'horloge s'arrête lorsque l'utilisateur clique sur « Stop », si la plage de mesures a été balayée ou en cas d'erreur du monochromateur.

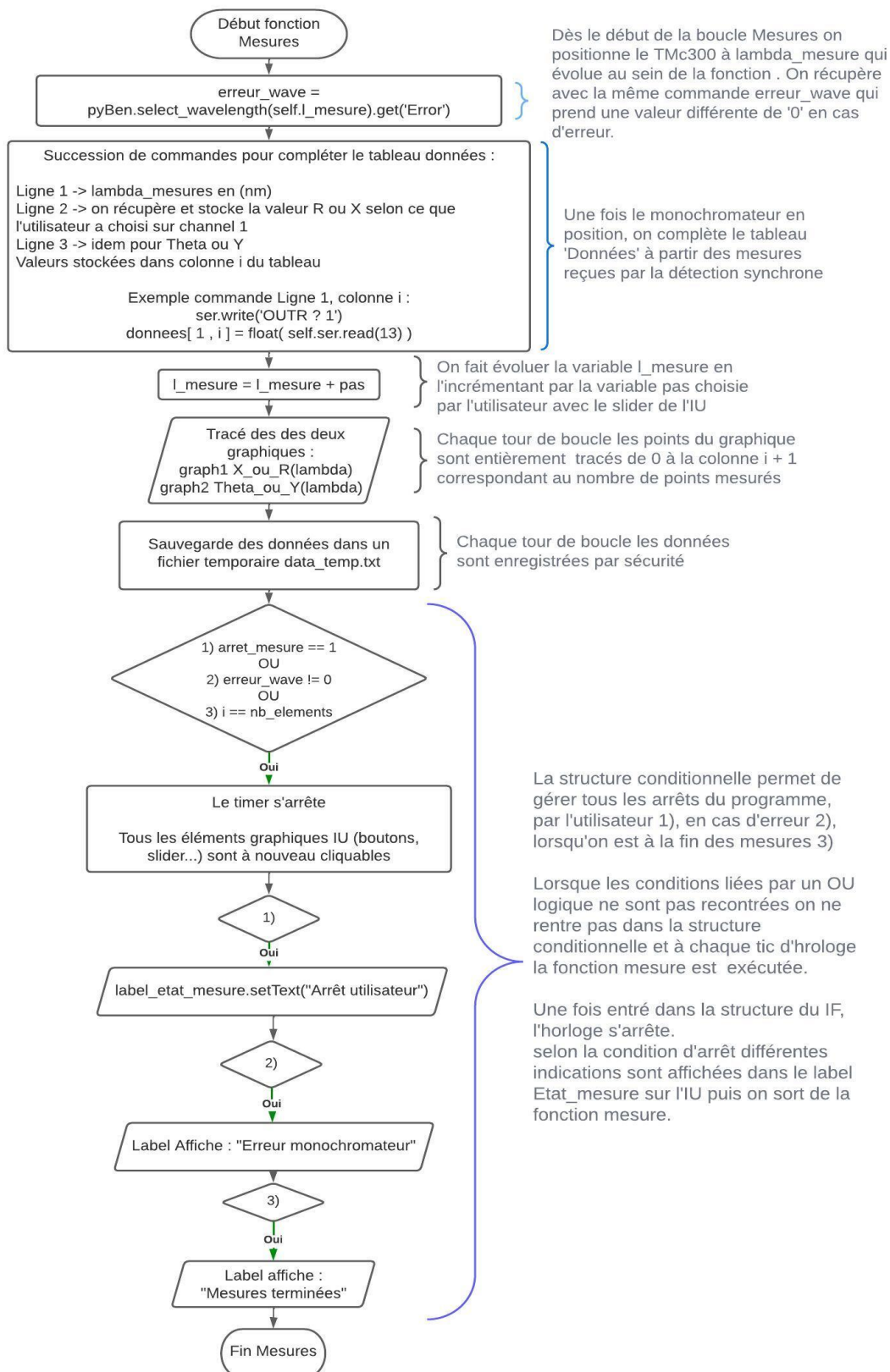


Figure 15. Algorithme de la fonction Mesures.

D'autres fonctions permettent au programme de fonctionner correctement. Elles sont détaillées ci-après.

#### Fonction Ordre 0 :

Tout comme à la fin de l'exécution de la fonction initialisation, la fonction ordre zéro liée à son bouton permet de positionner le monochromateur à l'ordre zéro. Cela permet de laisser passer toutes les longueurs d'onde à travers le monochromateur, utile pour le réglage des éléments optiques.

#### Fonction Stop :

Cette fonction permet d'arrêter l'horloge, ainsi d'arrêter la mesure et indirectement d'afficher dans le label état de la mesure « Arrêt utilisateur.trice » sur l'interface graphique.

#### Fonction Mesure de température :

Dans cette fonction, un calcul est effectué afin de retrouver la température à partir des caractéristiques propres à la thermistance de platine, le capteur utilisé dans le TP. L'utilisateur.trice peut indiquer le nombre de mesures de température à effectuer afin de les moyenner. On entre les paramètres de mesure de température dans l'onglet réglages de l'IU (voir Figure 12). Toutefois cette fonction de mesure de température n'est pas intégrée au banc de test du TP car pas nécessaire pour un TP où les élèves pourraient à la fois faire de l'électroluminescence et de la photoluminescence. Il s'agit d'un élément supplémentaire qui peut être utilisé ou non selon la décision des tuteurs concernant l'évolution du TP.

#### Fonction Sauvegarder :

Elle permet à l'utilisateur de sauvegarder les spectres mesurés une fois que la mesure est arrêtée. Les données sont sauvegardées dans un dossier « mesures » séparé du dossier contenant le code, le fichier s'intitule « data\_final.txt ». Les données récupérées dans la fonction mesure étaient stockées dans un tableau de trois lignes et autant de colonnes qu'il y a de mesures. Ainsi, pour effectuer le traitement de ces données à l'issue des mesures, la fonction sauvegarde transpose le tableau de mesures afin d'avoir trois colonnes, une pour  $\lambda$  en nm, une pour la valeur R ou X, une pour la valeur  $\theta$  ou Y et autant de lignes que de mesures effectuées lors de l'acquisition du spectre.

Également, comme visible dans la Figure 15 les données sont enregistrées automatiquement dans un fichier temporaire, permettant d'éviter toute perte lors d'une erreur.

#### Fonction Effacer :

Cette fonction permet d'effacer les deux graphiques de l'interface utilisateur et également de vider le tableau « données » afin de ne pas avoir de données résiduelles lorsqu'on relance la mesure de spectre.

Par ailleurs, de manière globale sur le programme nous avons essayé de limiter les possibles erreurs lors de l'exécution en limitant le nombre de choses possible à faire suivant les actions faites par le programme. Par exemple, nous avons empêché de faire une mesure de température durant une mesure de spectre car cela fait considérablement ralentir l'exécution. En effet, on demande à la détection synchrone différentes données en même temps et la communication série n'est pas assez rapide pour tout gérer en même temps sans prendre le risque de causer l'arrêt du programme. Enfin, nous l'avons considérablement testé en réalisant nous-même de nombreuses mesures de spectres sans que des problèmes d'instabilité apparaissent.



## B. Travail pratique et expérimental

Nous savions que pour les deux types d'expériences que nous avons à réaliser, nous aurions besoin d'un banc optique avec un rail et de placer des éléments sur ce rail en ayant le monochromateur

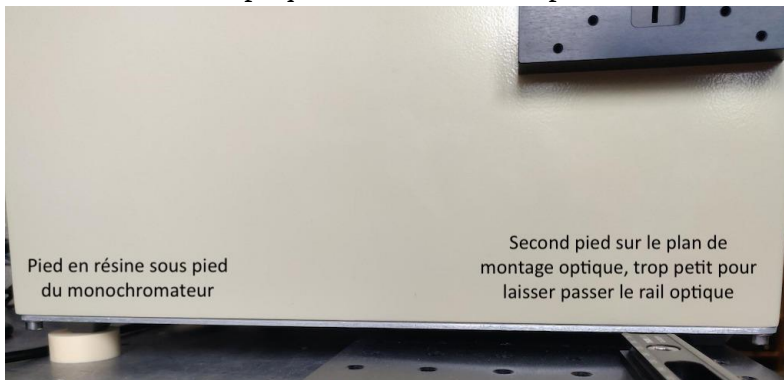


Figure 16. Vue des pieds côté sortie du monochromateur.

au milieu de ce montage. Cependant, le rail est plus épais que la hauteur des pieds du monochromateur et nous ne disposons pas de panneau de montage optique (optical breadboard) assez grand pour placer le rail et le monochromateur dessus. Nous avons choisi donc d'utiliser deux rails séparés, un de chaque côté du monochromateur et de réaliser des pieds pour le monochromateur. En effet, le monochromateur étant à la fois sur le panneau de montage optique et sur la table il faut lui faire des pieds à la bonne hauteur comme visible sur la Figure 16. Nous avons pu ensuite récupérer des éléments optiques des différents bancs optiques de TP4, notamment celui du TP sur lequel nous travaillons, pour compléter les montages expérimentaux.

### i. Réalisation des expériences d'électroluminescence

Afin de pouvoir réaliser le banc de test tout d'abord, nous nous sommes vite aperçus qu'un élément central nous manquait et c'est pourquoi nous avons imaginé ce boîtier visible dans la Figure 17. Il est nécessaire pour faire ce montage d'avoir un ampèremètre en série avec la LED. Comme

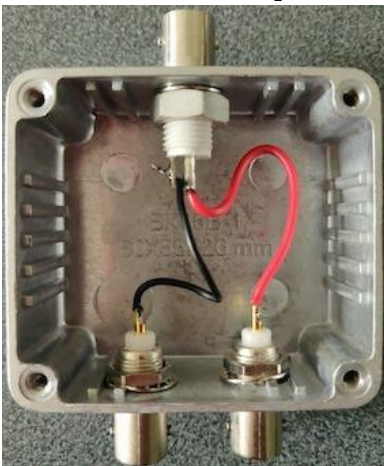


Figure 17. Photo de l'intérieur du boîtier.

visible en Figure 4, nous avons déjà à notre disposition ce câble qui permettait de faire la liaison avec une LED, nous avons donc adapté le montage autour de cela et avons réalisé ce boîtier. On y reconnaît en haut la prise mâle coaxial pour la LED avec la tresse de blindage et l'âme connectées aux âmes respectives de deux autres prises mâles coaxiales formant ainsi ce dont nous avons besoin.

Le câble coaxial qui se divise en deux à une de ses extrémités (voir Figure 4) avait déjà été réalisé par M. Lassagne, nous avons juste à créer le reste des connexions pour pouvoir l'utiliser. C'est pour cela que nous avons préféré utiliser ce boîtier plutôt que d'adapter deux câbles coaxiaux aux branchements de la LED.

Le reste du montage électrique était déjà implicite après avoir réalisé nous-même le TP en cours. Tous les éléments optiques sont montés sur rail permettant de les aligner facilement. On les met ensuite aux bonnes distances les uns par rapport aux autres, permettant d'avoir la lumière de la LED focalisée dans la fente d'entrée du monochromateur et la lumière de sortie du monochromateur focalisée sur la photodiode. Si la LED émet dans des longueurs d'onde hors du visible, on peut procéder à l'ajustement avec une LED qui émet dans le visible puis la remplacer par la LED souhaitée afin que l'on ait déjà un alignement grossier correct.

Après l'initialisation réussie le monochromateur laisse passer toutes les longueurs d'onde et permet donc de vérifier le montage. Il est important de vérifier que la détection synchrone est bien en

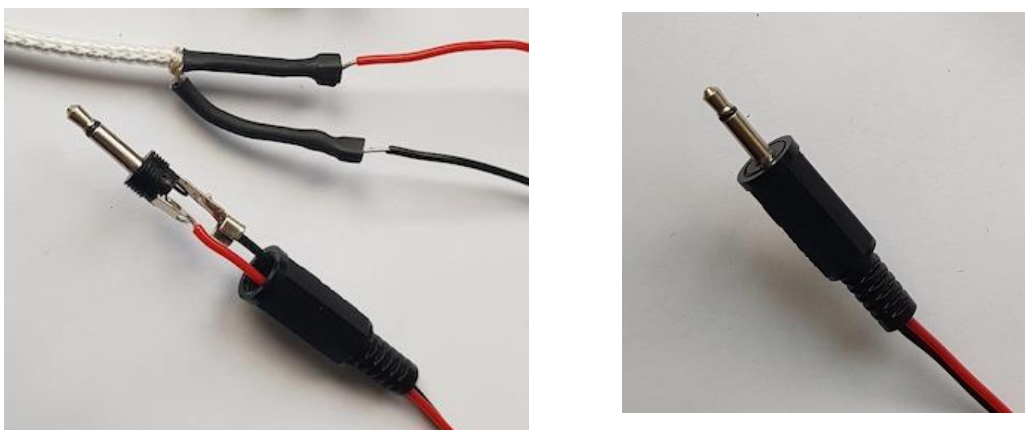
mesure de capter le signal, donnant notamment une valeur stable à  $\theta$  et également stable pour R, X et Y. Cette étape est indispensable pour vérifier que nous n'avons pas fait d'erreur de paramètre sur la détection synchrone. En effet il faut bien vérifier que :

- Le mode de l'entrée est bien le courant.
- La détection synchrone impose bien sa fréquence de modulation au générateur de pulses et que celui-ci la prend bien en compte.
- La fréquence ne doit pas être ni trop importante ni trop faible pour avoir une réponse la plus fidèle du générateur de pulses (marche parfaitement entre 100 et 500 Hz) et ne doit pas être un multiple de 50 Hz pour ne pas laisser la fréquence identique du réseau électrique interférer avec la mesure.
- La constante de temps d'intégration doit être supérieure à la période du signal de modulation, la règle empirique indique qu'une constante de temps supérieure à 7 fois la période du signal est une bonne constante de temps.
- La sensibilité de la mesure ne doit pas être trop grande au risque de saturer lors de la mesure et donc de couper toute une partie du signal. Par expérience, un ou deux crans plus précis que la sensibilité lors de l'ordre zéro est généralement adapté.

Après ces étapes et éventuellement les ajustements des réglages on peut lancer la mesure comme on le souhaite sur le programme.

Ainsi, nous avons pu réaliser différents spectres à voir page 21.

Afin de préparer les expériences de photoluminescence nous devons réaliser le spectre du LASER. Il fallait donc relier le LASER au pulse ou du moins trouver un moyen d'imposer une fréquence de modulation au signal du LASER. Nous avons d'abord choisi l'option de relier le LASER directement au générateur de pulses. Pour cela il fallait créer ce câble visible en Figure 18.



*Figure 18. Intérieur du câble d'alimentation du LASER et câble du LASER vissé.*

Cependant, cette méthode n'a pas très bien fonctionné, le LASER nécessite 5V continu pour son alimentation et mettre un signal carré en entrée de son alimentation à 5V n'a pas donné une puissance importante du LASER contrairement à la diode où c'était largement suffisant d'avoir un signal carré pour avoir une puissance lumineuse correcte. On pouvait néanmoins tout de même réaliser le spectre du LASER mais cela n'allait pas être suffisant pour réaliser les expériences de photoluminescence.

## ii. Réalisation des expériences de photoluminescence

Pour avoir une puissance suffisante du LASER et qu'il soit modulé à une fréquence, nous avons utilisé le chopper optique comme détaillé en Figure 9 et relié le LASER à une alimentation 5V continue. Nous avons tout d'abord essayé d'obtenir des résultats avec un banc simple dont on peut voir le schéma optique en Figure 19.

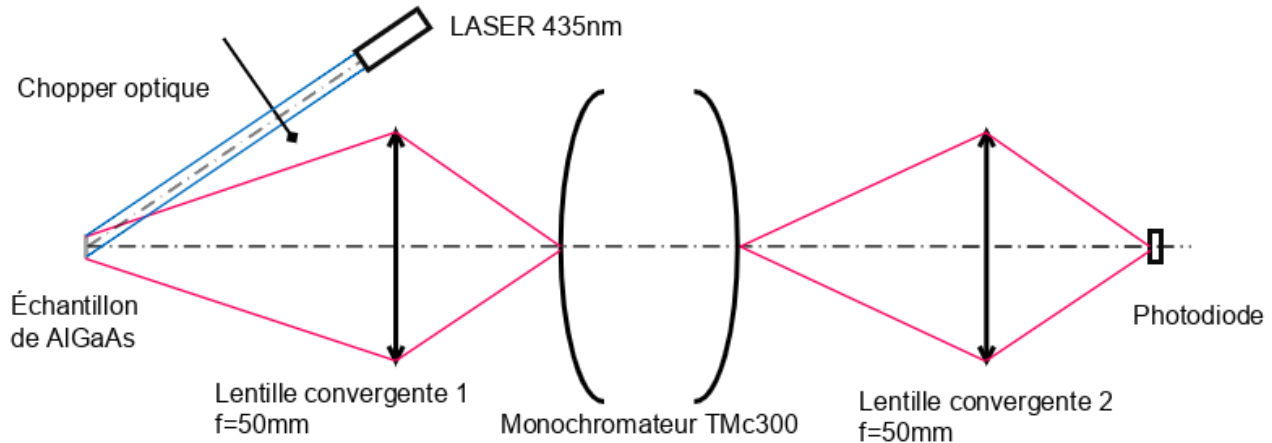


Figure 19. Schéma du premier essai de banc optique pour la photoluminescence.

Ce montage est bien moins sophistiqué que celui présenté en Figure 9. Il correspond au montage utilisé pour l'électroluminescence mais avec le LASER et le chopper optique en plus. Il n'y a pas d'améliorations au niveau optique. Nous n'avons pas réussi à obtenir de résultat avec ce banc optique. Nous avons essayé d'éloigner l'échantillon du monochromateur afin d'avoir la lumière du LASER venant le plus à la normal possible sur l'échantillon ou à l'inverse rapprocher l'échantillon le plus possible de la lentille et du monochromateur pour capter un maximum de signal émis par l'échantillon car celui-ci émet dans toutes les directions.

Après avoir demandé conseil à M. Balocchi, nous avons pu entreprendre de réaliser et tester le banc optique montré en Figure 9.

Pour disposer correctement tous les éléments afin d'avoir la plus grande précision possible, nous avons suivi les étapes suivantes à partir d'un rail optique vide :

- Positionnement du monochromateur au centre, rails de chaque côté, fente du monochromateur grossièrement alignée avec les rails.
- Positionnement de l'échantillon en bout de rail côté entrée et d'un LASER quelconque côté sortie.
- Ce LASER, en l'allumant vers l'échantillon (donc dans le sens inverse du trajet de la lumière dans l'expérience finale), allait nous servir pour régler l'alignement optique. Nous devons faire en sorte de l'aligner avec l'axe optique défini par les rails optiques afin qu'il devienne la référence d'alignement pour le reste du montage optique.
- Mise à l'ordre zéro du monochromateur, il laisse passer toute la lumière.
- Vérification que la lumière du LASER sort de la fente d'entrée également au centre de la fente afin d'avoir un bon alignement optique.
- Positionnement de la hauteur de l'échantillon afin que la lumière se focalise au centre.
- Comparaison de la hauteur du faisceau du LASER à la sortie du LASER et au niveau de l'échantillon, elle doit être identique.



Ainsi, nous avons notre axe optique matérialisé par le faisceau LASER.

- Matérialisation de la position du LASER sur l'échantillon, en utilisant par exemple une croix marquée sur un scotch posé sur l'échantillon.
- On éteint le LASER d'alignement et on rajoute un à un les autres éléments.
- Positionnement du LASER utile à l'expérience, visible sur la Figure 9. Il doit être le plus proche de l'axe optique sans entraver le trajet optique. Il doit envoyer son faisceau directement sur la croix (très grossier car non focalisé).
- Placement de la lentille 0, de même elle ne doit pas gêner le reste du montage et focaliser parfaitement le faisceau du LASER sur la croix. Des ajustements de la position du LASER et de la lentille permettent d'arriver à un résultat satisfaisant.
- Retrait du scotch sur l'échantillon et vérification que le laser touche bien l'échantillon derrière la croix.
- Ajout de la lentille 1 sur le rail optique. Ajustement de sa position en hauteur pour être bien centrée et de sa distance avec l'échantillon. Sa distance est correcte quand la lumière qui en sort ne diverge ou converge pas, mais garde bien le même étalement que l'on soit juste derrière la lentille ou au niveau de la fente du monochromateur. Les rayons à sa sortie sont alors à l'infini.
- Ajout de la lentille 2 sur le rail optique, elle doit focaliser en un point au centre de la fente d'entrée la lumière qui provient de la lentille 1.
- Vérification de la présence de lumière à la sortie du monochromateur et placement de la photodiode à la bonne hauteur pour capter du signal.

Une fois le banc optique terminé, nous pouvons passer aux vérifications côté détection synchrone comme mentionné page 18. Pour chaque réglage optique, il est nécessaire d'avoir au minimum un morceau de papier blanc afin de pouvoir couper le faisceau lumineux et voir son évolution en taille permettant de vérifier le bon placement des éléments.

Afin de faire de la photoluminescence sur le du bandeau de LED nous avons essayé d'enlever la couche de plastique enrobant le bandeau. En effet, si le LASER est pointé sur le bandeau et doit traverser le plastique il est diffusé à l'intérieur du matériau et on perd tout l'intérêt de l'avoir focalisé en un point, les chances de réaliser la photoluminescence sont fortement réduites. Cependant, il reste une couche protectrice du matériau semi-conducteur et celui-ci est très petit. Ainsi, non seulement la lumière est tout de même diffusée à l'intérieur d'un volume (certes beaucoup plus faible et plus localisé par rapport à précédemment) mais également le point ciblé est encore plus petit que pour l'échantillon d'AlGaAs, rendant l'opération encore plus délicate.

## IV. Résultats et éléments d'amélioration

### A. Résultats expérimentaux

Voici les différents résultats obtenus dans la configuration du banc de test détaillée précédemment.

Pour commencer, afin de valider le fonctionnement du programme et de l'interface utilisateur nous avons réalisé le spectre d'une diode blanche visible en Figure 20. La mesure de ce spectre nous a permis de voir que le monochromateur exerçait correctement sa fonction de balayage du spectre sur une grande plage de longueurs d'ondes, que les réglages de la détection synchrone étaient bien calibrés et qu'on captait une intensité à la sortie du monochromateur avec la photodiode. De plus, nous avons pu tester notre fonction de sauvegarde des données et vérifier qu'il est possible de les extraire facilement afin de les traiter sur Excel.

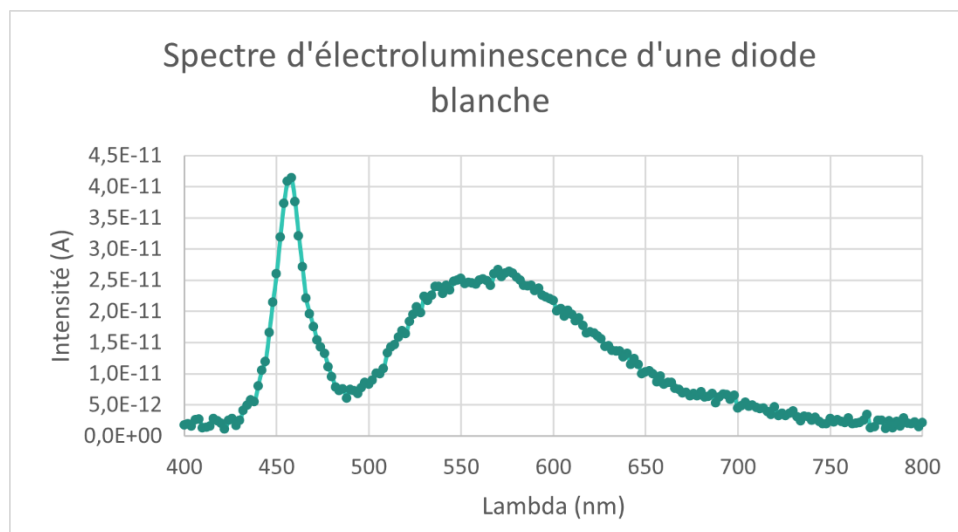


Figure 20. Spectre d'électroluminescence d'une diode blanche réalisé dans les conditions présentées dans le banc de test de la Figure 5.

Ce type de spectre est attendu pour une diode blanche. On y voit un pic d'intensité dans le bleu qui, par fluorescence sur un élément dédié dans la LED, permet d'émettre une plus grande plage de longueur d'onde comme visible de 500 à 650nm.

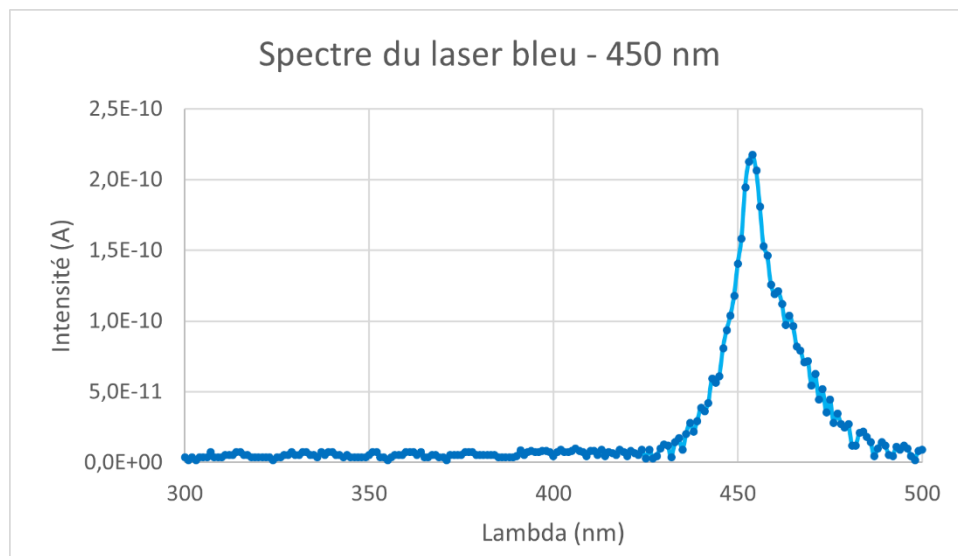


Figure 21. Spectre du LASER bleu de puissance 5 mW utilisé pour l'excitation des échantillons.

Afin de procéder aux mesures de photoluminescence de différents échantillons, nous les avons soumis au faisceau d'un LASER bleu 450 nm. Son rôle est d'exciter l'échantillon avec une énergie suffisante afin que le matériau ciblé puisse absorber cette énergie et émettre un rayonnement lumineux lors de la désexcitation des électrons et leur retour vers la bande de valence. En effet, son énergie doit être supérieure à l'énergie de gap du semi-conducteur visé, comme vu page 8. Ainsi, nous avons réalisé le spectre du LASER bleu afin de pouvoir sur un spectre de photoluminescence différencier et reconnaître le spectre associé au LASER et la réponse en photoluminescence du matériau.

Nous avons réalisé deux expériences de photoluminescence. La première expérience a été effectuée sur une diode électroluminescente rouge éteinte, sans aucun courant appliqué avec le banc détaillé en Figure 19. L'objectif était de chercher dans le spectre un pic d'intensité pour une longueur d'onde différente de celle du reflet du LASER bleu projeté sur la diode rouge. Cette expérience n'a pas abouti, la puissance faible du LASER, la surface de la diode ciblée par le LASER en plus des incertitudes liées au montage peuvent expliquer le manque de signal reçu par la photodiode.

En revanche, la deuxième expérience effectuée sur un échantillon d'AlGaAs, selon le banc optique de la Figure 8, nous a permis d'obtenir le spectre de photoluminescence d'AlGaAs. Sur le graphique Figure 32 ci-dessous, le spectre atteint un maximum d'intensité pour une longueur d'onde de 842 nm, un pic d'intensité situé dans le domaine de l'infrarouge. Il est bien différent du pic autour de 450 nm engendré par le reflet du LASER bleu.

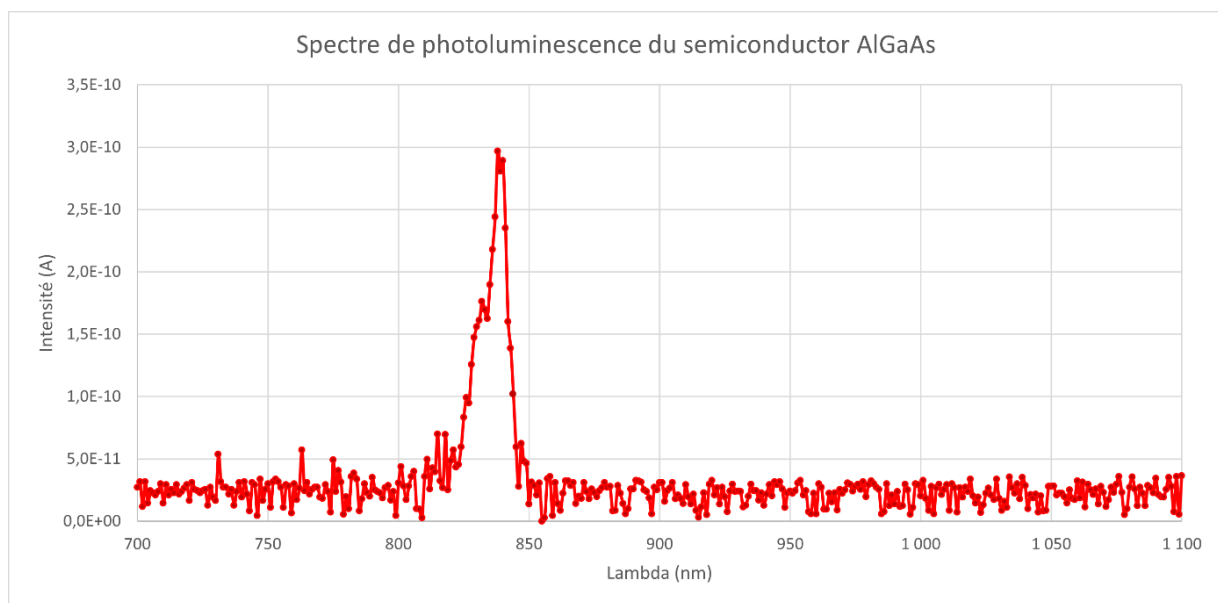


Figure 22. Spectre de photoluminescence d'un échantillon de AlGaAs, excité par un LASER à 450 nm.

## B. Pistes d'améliorations

### i. Éléments du code

Plusieurs points pourraient être améliorés.

Dans la fonction mesure, après différents tests nous avons conclu que c'est la communication avec la détection synchrone qui prend la majorité du temps pour que celle-ci s'effectue. En effet, cette fonction pourrait se faire plus rapidement, elle prenait deux secondes à se réaliser, indépendamment de la vitesse de l'horloge. Comme nous avons pu déterminer le fait que ce temps long était uniquement dû à la communication avec la détection synchrone, nous n'avons pas beaucoup de solutions s'offrant à nous à part changer de protocole de communication. En effet, la communication se fait en utilisant

la librairie Pyserial qui est faite pour communiquer avec les instruments utilisant un port série comme RS232. Cependant, ce n'est pas la seule librairie pouvant permettre de communiquer avec du RS232. Pyvisa est une librairie qui permet de communiquer avec n'importe quel instrument. Nous ne savons pas avec certitude si l'utiliser pour la détection synchrone est plus rapide qu'utiliser Pyserial mais c'est généralement le cas avec d'autres appareils. Malheureusement, nous n'avons pas réussi à la faire fonctionner correctement. Nous nous sommes rabattus sur une solution d'entre deux en réduisant le nombre de caractères récupérés auprès de la détection synchrone à chaque mesure, permettant de passer de deux à une seconde pour l'exécution de la fonction mesure. En effet, un nombre plus important de caractères fait ralentir la fonction car le programme doit attendre plus longtemps pour récupérer plus de caractères.

Comme visible sur l'IU dans le panneau « Réglages » un début de fonction « Autorange » a été fait. Cette fonction permettrait de régler la sensibilité de la mesure afin d'avoir la meilleure sensibilité et donc la plus grande précision possible. Nous avons codé un début de fonction côté python, avec le principe suivant :

- Si la valeur est à 90 % ou plus de la limite maximum de la sensibilité actuelle alors passer au niveau supérieur
- Si, au contraire, la valeur est à 10 % ou moins de la sensibilité actuelle alors passer au niveau inférieur

Pour savoir à quel niveau de sensibilité la détection synchrone se trouve, il faut lui demander puis la lire. Supposons que l'utilisateur·trice change manuellement le niveau de la sensibilité malgré la présence de cette fonction, il faut alors demander à chaque exécution de la fonction mesure le niveau de la sensibilité. Au vu du problème évoqué précédemment, rajouter cela dans la fonction mesure ne semble pas être une bonne idée pour optimiser le temps d'exécution. Il faudrait alors pouvoir régler le problème précédent avant de pouvoir continuer avec cette fonction.

Également, régler la sensibilité ne peut se faire que basé sur une valeur. Quand on choisit de mesurer R et  $\theta$  seul R a une sensibilité,  $\theta$  étant un angle compris entre  $-180$  et  $180^\circ$ . On pourrait donc utiliser cette fonction. Néanmoins, dans le cas où le choix est porté sur X et Y, ajuster la sensibilité pour les deux est une affaire plus complexe que ce que ce fonctionnement basique propose. Enfin, sachant à quel ordre de grandeur d'intensité s'attendre grâce au réglage du monochromateur à l'ordre 0, l'expérimentateur·trice prérègle la sensibilité à une valeur plus élevée que ce que donne le bruit. Néanmoins l'activation de la fonction Autorange pourrait engendrer des problèmes. Le bruit étant très variable, il se pourrait que la fonction amène la détection synchrone à changer de sensibilité à chaque exécution de la fonction Mesures. Lors de l'apparition du pic, le retard avec lequel cette fonction agit pourrait saturer la mesure et donc faire perdre des données.

## **ii. Dispositif expérimental**

La mesure de photoluminescence est relativement difficile à faire fonctionner, surtout pour des étudiant·e·s non habitué·e·s à tant de précision sur des montages optiques. De plus, l'expérience finale permettant de comparer les mesures de photoluminescence à l'électroluminescence d'une LED du bandeau de LED n'a pas pu aboutir. Il serait nécessaire de pouvoir préparer des échantillons plus faciles à tester ou de pouvoir effectuer de la photoluminescence sur un bandeau de LED sans protection plastique ou sur une LED classique comme testé en électroluminescence. Éventuellement, on pourrait essayer de faire un dispositif capable d'émettre de la lumière et ayant une des surfaces du semi-conducteur non intégré de l'ordre de  $1\text{mm}^2$  pour que l'on puisse la viser correctement avec le LASER. À l'inverse, on pourrait utiliser un LASER plus puissant qui serait diffusé dans le dispositif

mais qui serait assez puissant pour tout de même générer assez de photoluminescence pour que l'on puisse l'observer. Par contre, cela pourrait poser des problèmes de sécurité quant à la puissance du LASER et des précautions devraient être prises.

## V. Conclusion

Pour conclure, nous avons pu réaliser la majorité des objectifs. Nous fournissons un programme complet, testé, relativement optimisé et répondant au cahier des charges. Nous fournissons également le manuel d'utilisation. De plus, notre code est commenté dans le détail permettant de pouvoir être repris, compris, modifié et amélioré. Les résultats obtenus sont cohérents et prouvent le fonctionnement du code. Nous avons aussi réussi à réaliser une expérience de photoluminescence, démontrant la faisabilité de cette expérience.

Néanmoins, des améliorations peuvent être faites, tant au protocole expérimental pour rendre l'expérience de photoluminescence plus reproductible, tant au code pour le rendre plus rapide et lui ajouter des fonctionnalités.

Durant ce projet nous avons acquis de nombreuses connaissances et compétences scientifiques. Nous avons appris à instrumenter en Python, en créant à la fois un code et une interface graphique. Nous avons compris en détail le fonctionnement d'un monochromateur et de la détection synchrone. Enfin, nous avons approfondi nos connaissances sur la réalisation d'une expérience d'optique et le montage d'un banc de test optique.

Par ailleurs, nous avons appris à organiser notre travail sur un projet de cette envergure tout au long de l'année. Nous avons également appris à gérer la communication avec nos tuteurs et entre nous afin d'avoir le meilleur fonctionnement possible. C'est la première fois que l'on nous confie un projet de cette importance, premier projet qui à nos yeux nous donne une idée de ce que peut être le métier d'ingénieur.e.

Toutes les compétences que nous avons acquises nous seront utiles et pourront être valorisées dans notre futur métier.

## VI. Bibliographie

- BENTHAM INSTRUMENTS LTD. *Datasheet TMc300*. [en ligne]. Disponible sur : [https://www.bentham.co.uk/fileadmin/uploads/bentham/Components/Monochromators/Configurable%20Monochromators/TMc300/Data-Sheet\\_TMc300.pdf](https://www.bentham.co.uk/fileadmin/uploads/bentham/Components/Monochromators/Configurable%20Monochromators/TMc300/Data-Sheet_TMc300.pdf)
- BENTHAM INSTRUMENTS LTD. Janvier 2013. *Spectroradiometer software development kit*. Version 4.1.1.
- BENTHAM INSTRUMENTS LTD. Mars 2015. *TMc300 Manual*. Version 2.0.
- FLORENT HOUELIER, CNRS. 2022. *Cours d'optique géométrique*.
- PLC, Renishaw, [sans date]. Renishaw: Photoluminescence. *Renishaw* [en ligne]. [Consulté le 18 Mai 2023]. Disponible à l'adresse : <http://www.renishaw.com/en/photoluminescence-explained--25809>
- STANFORD RESEARCH SYSTEMS. 2011. *MODEL SR830 DSP Lock-In Amplifier*. [en ligne]. [Consulté en novembre 2022]. Disponible sur : <https://www.thinksrs.com/downloads/pdfs/manuals/SR830m.pdf>

## VII. Table des illustrations

Figure 1. Schéma monochromateur TMc300 .....	4
Figure 2. Schématisation du phénomène d'électroluminescence .....	6
Figure 3. Schéma du banc de test électrique d'électroluminescence.....	6
Figure 4. Câble coaxial séparé en deux à son bout, permettant de l'utiliser comme câble double.....	7
Figure 5. Schéma du banc de test optique pour l'expérience d'électroluminescence.....	8
Figure 6. Diagramme énergétique montrant l'absorption de la lumière et les processus impliqués dans l'émission de lumière sous forme de fluorescence et de phosphorescence.....	8
Figure 7. Schéma du banc de test électrique de photoluminescence. ....	9
Figure 8. Chopper optique. ....	9
Figure 9. Schéma du banc optique de photoluminescence. ....	10
Figure 10. Photo de la première partie du banc optique de photoluminescence.....	10
Figure 11. Erreur résiduelle de lentilles simple, achromate et apochromate. ....	11
Figure 12. Captures d'écran de l'IU à l'ouverture du programme dans l'onglet « Programme principal » et l'onglet « Réglages » pour la mesure de Température. ....	12
Figure 13. Algorithme de la fonction Initialisation.....	13
Figure 14. Algorithme de la fonction Démarrer.....	14
Figure 15. Algorithme de la fonction Mesures. ....	15
Figure 16. Vue des pieds côté sortie du monochromateur. ....	17
Figure 17. Photo de l'intérieur du boîtier.....	17
Figure 18. Intérieur du câble d'alimentation du LASER et câble du LASER vissé.....	18
Figure 19. Schéma du premier essai de banc optique pour la photoluminescence.....	19
Figure 20. Spectre d'électroluminescence d'une diode blanche réalisé dans les conditions présentées dans le banc de test de la Figure 5. ....	21
Figure 21. Spectre du LASER bleu de puissance 5 mW utilisé pour l'excitation des échantillons...	21
Figure 22. Spectre de photoluminescence d'un échantillon de AlGaAs, excité par un LASER à 450 nm.....	22



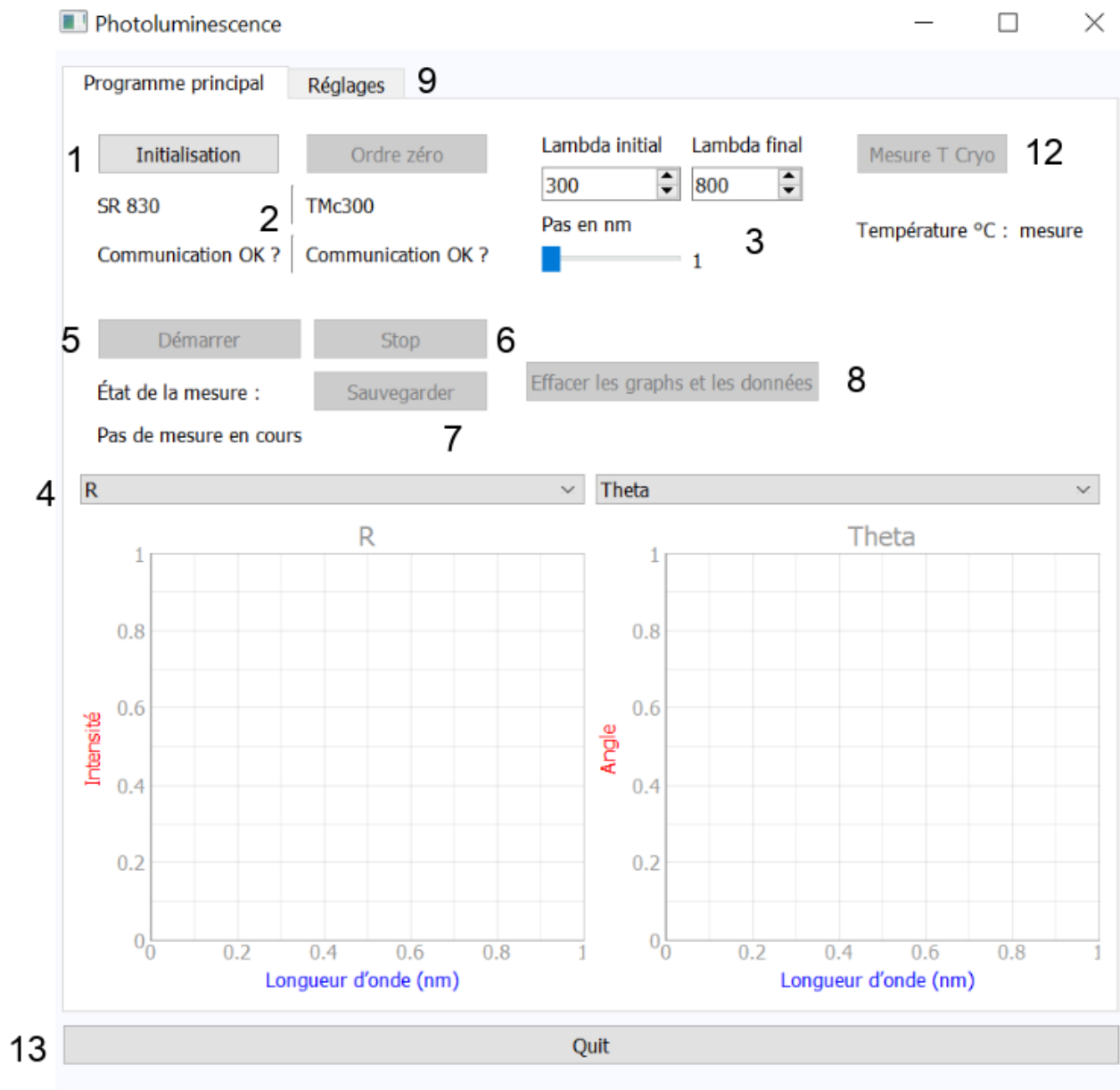
## **VIII. Annexe**

<b>ANNEXE A : Manuel D'utilisation.....</b>	<b>i</b>
---	----------

# ANNEXE A : Manuel D'utilisation

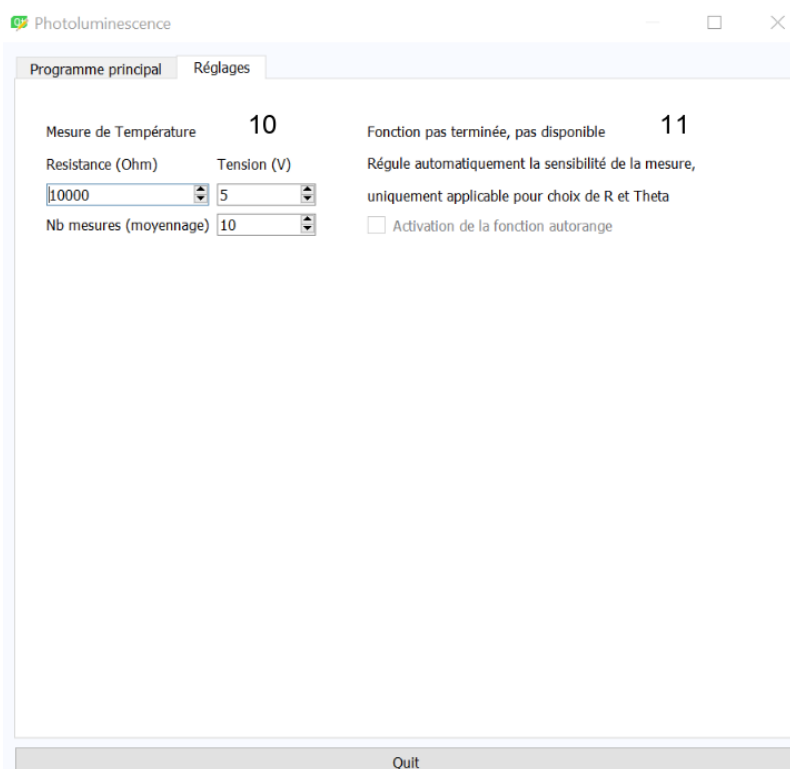
## Manuel d'utilisation du programme

Après avoir lancé le programme, l'Interface Utilisateur·trice (IU) se présente de la manière suivante :



1. Après avoir vérifié que la détection synchrone et le monochromateur sont bien allumés et connectés à l'ordinateur, on peut appuyer sur le bouton initialisation.
2. Si l'initialisation est réussie alors « SR 830 » s'affiche à la place de « Communication OK ? » pour la détection synchrone. Pour le monochromateur « Initialisation en Cours » s'affiche puis « Initialisation réussie ». Si une erreur il y a une erreur d'initialisation avec le monochromateur, le redémarrer et repartir de l'étape 1.
3. Les réglages de la mesure se font avec la longueur d'onde de départ et la longueur d'onde de fin ainsi que le pas allant de 1 à 10nm.

4. Deux types de données sont disponibles pour chaque graphique, R ou X pour le premier,  $\theta$  ou Y pour le second. Sélectionner le type choisi, on ne peut pas changer durant la mesure.
5. Le bouton démarrer lance la mesure et « Mesure en cours » remplace « Pas de mesure en cours ». Si une erreur du monochromateur apparaît durant la mesure alors « Erreur monochromateur » apparaît et la mesure s'arrête. Si c'est le cas, le re-démarrer et repartir de l'étape 1. À la fin de la mesure « Mesures terminées » s'affiche.
6. Permet de stopper la mesure, il y a un petit délai entre le clique sur le bouton et l'arrêt de la mesure. « Arrêt utilisateur.trice » s'affiche à la place de « Mesure en cours ». En cas d'urgence, débrancher les appareils.
7. À la fin des mesures quel que soit le type d'arrêt, ce bouton permet de sauvegarder dans un dossier séparé « mesures » un fichier texte ayant dans sa première colonne la longueur d'onde, dans la deuxième les données du graphique 1 et dans la troisième les données du graphique 2. Par ailleurs, un fichier temporaire est sauvegardé à chaque mesure dans un dossier séparé « fichiers\_temporaires ». Il se présente de la même manière que le fichier lors de la sauvegarde manuel. Avant une deuxième sauvegarde après une autre mesure, pensez bien à renommer le premier fichier que vous avez sauvegardé sinon il sera écrasé.
8. Ce bouton permet d'effacer les données dans le graphique avant de relancer une nouvelle mesure et également d'effacer les données temporaires mesurées par le programme.
9. Certains réglages concernant la mesure de température sont présents sur cette partie uniquement.



10. Résistance : valeur correspondant à la thermistance utilisée. Tension : tension envoyée dans la thermistance pour faire la mesure. Nb mesures : nombre de mesures effectuées, plus c'est important plus cela améliore la qualité de la mesure.

11. Comme précisé sur l'interface, cette fonction n'est pas terminée d'où la non possibilité de cocher l'activation de cette fonction.

12. Une fois les réglages faits en 10, on peut appuyer sur ce bouton pour mesurer la température et la valeur sera affichée en degrés Celsius à la place de « mesure ».

13. Le bouton Quit sert à quitter le programme. Pour ne pas

créer de bug, veuillez toujours quitter le programme via le bouton Quit et pas via la fermeture de la fenêtre. Si vous faites cela le programme continue à tourner malgré la fermeture de l'interface et cela peut créer des bugs au redémarrage.