

***Projet de Physique P6***  
**STPI/P6/2022 – 31**

**MESURES DE SPECTRES DE TRANSMISSION  
D'ÉLÉMENTS OPTIQUES PAR L'UTILISATION D'UNE  
SPHÈRE INTÉGRANTE ET D'UN SPECTROMÈTRE**



**Etudiantes :**

**Kenza KALAÏ TLEMÇANI**

**Ilayda ÖMÜR**

**Pauline BENAROUS-FRAPPART**

**Lucile LECLERC**

---

**Enseignant-responsable du projet :**

**Maxime JORET**

*Cette page est laissée intentionnellement vierge.*

---

Date de remise du rapport : **11 juin 2022**

Référence du projet : **STPI/P6/2022 – 31**

Intitulé du projet : **Mesures de spectres de transmission d'éléments optiques par l'utilisation d'une sphère intégrante et d'un spectromètre**

Type de projet : **Théorique et expérimental**

Objectifs du projet :

- **Comprendre et étudier différents types de mesures de spectres à l'aide d'une sphère intégrante et d'un spectromètre**
- **Comprendre le fonctionnement interne d'un spectromètre, et le calibrage d'une sphère intégrante**
- **Application d'une utilisation de la sphère avec un objet du quotidien**

Mots-clefs du projet :

- **Calibrage**
- **Sphère intégrante**
- **Spectre**

## TABLE DES MATIERES

1. Introduction.....	6
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	7
3. Travail réalisé et résultats.....	8
3.1. Fonctionnement de la sphère intégrante et du spectromètre.....	8
3.1.1. La sphère intégrante.....	8
3.1.2. Le spectromètre.....	11
3.2. Expériences.....	14
3.2.1. Analyse du calibrage d'un appareil photo.....	14
3.2.2. Analyse de filtres.....	17
4. Conclusion et perspectives.....	20
5. Bibliographie.....	21
6. Annexes.....	23
6.1. Schémas de différentes utilisations d'une sphère intégrante.....	23
6.1.1. Mesure de la puissance d'une source lumineuse divergente.....	23
6.1.2. Mesure de la puissance d'un faisceau laser.....	23
6.1.3. Mesure de la puissance de sortie d'une fibre optique.....	24
6.1.4. Mesure de la transmittance.....	24
6.1.5. Mesure de la réflectance.....	25
6.2. Photos et graphiques de notre manipulation.....	26
6.3. Code python utilisé pour récupérer et analyser les profils en bleu des différentes images.....	28

## REMERCIEMENTS :

Nous remercions M. JORET Maxime pour nous avoir fait découvrir le CORIA, expliqué le sujet et nous avoir encadrées pour ce projet.

Nous remercions également M. YON Jérôme pour nous avoir aidées et guidées pendant l'absence de M. JORET Maxime.

Nous remercions M. LEFEVRE Guillaume pour nous avoir guidé durant notre séance pratique.

Enfin, nous remercions MME. GOJJARD Maélyne et MME. LANGRAND Julie pour le prêt de matériel.

## 1. INTRODUCTION

Les dispositifs optiques actuels permettent d'étudier avec une forte précision la lumière et ses caractéristiques. Grâce à l'expérimental, un cycle d'amélioration des appareils de mesure s'effectue : plus les dispositifs sont précis, meilleures sont les mesures et plus les mesures sont en adéquation avec la réalité, plus les dispositifs deviennent performants.

Cependant, l'amélioration des instruments s'accompagne de contraintes de maniement : lorsque les ordres de grandeur manipulés s'approchent de l'infinitésimal, la rigueur nécessaire pour la manipulation lors de la mise en place et de la prise de mesure augmente. Il est donc important de pouvoir vérifier la paramétrisation en se basant sur certaines conditions considérées idéales.

La sphère intégrante est un dispositif qui autorise de nos jours à en calibrer bon nombre d'autres car elle permet l'obtention d'un flux lumineux dit parfait. Sa caractéristique principale est que la distribution spatiale des faisceaux lumineux qui la pénètrent est idéale.

Elle est le plus souvent couplée à un spectromètre, et le but de notre projet est de comprendre le fonctionnement de ces deux appareils et éventuellement de tester une ou plusieurs de ses utilisations actuelles.

## 2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Nous avons commencé notre étude par quelques séances de présentations, réponses aux questions et bibliographies avec notre professeur accompagnant M. Joret. Nous avons poursuivi par nous-mêmes ces recherches afin de cerner la meilleure manière d'orienter notre projet. Par la suite, nous avons sollicité l'aide de M. Yon dans le but d'établir un protocole d'expérimentation avec un appareil photo et éventuellement la caméra d'un téléphone portable. Cette utilisation de la sphère nous a intéressée car elle offre une meilleure compréhension d'un objet du quotidien tout en appliquant des notions théoriques parfois très complexes vu en cours au sein de notre cursus. Finalement, nous avons pu effectuer une expérience pour illustrer notre sujet.

Pour ce qui est de la répartition des tâches, comme indiqué dans l'organigramme ci-dessous, nous avons toutes participé à la bibliographie. En effet, la bibliographie est un des points les plus importants en ce qui concerne la compréhension du sujet. Pour ce qui est des autres tâches, chacune avait sa partie attribuée mais nous organisons des mises en commun chaque semaine pour suivre l'avancée de tout le monde.

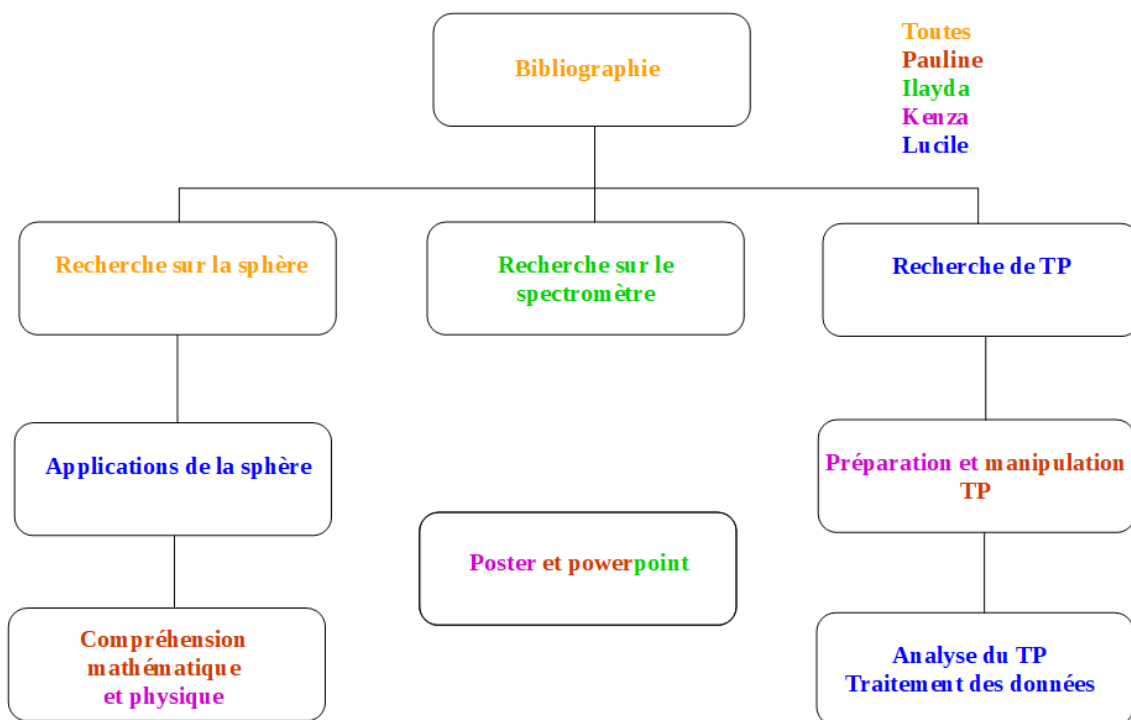


Figure 1 : Organigramme des tâches réalisées par les membres du groupe

### 3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

#### 3.1. Fonctionnement de la sphère intégrante et du spectromètre

##### 3.1.1. La sphère intégrante

La sphère intégrante, aussi appelée sphère d'Ulbricht, est un dispositif recouvert sur toute sa surface intérieure de peinture aux effets diffusants, c'est-à-dire par du Sulfate de Baryum  $BaSO_4$  pour le domaine du visible et par de l'or pour l'infrarouge. Son diamètre usuel se trouve entre 20 et 50 cm mais peut aller jusqu'à 2 m.

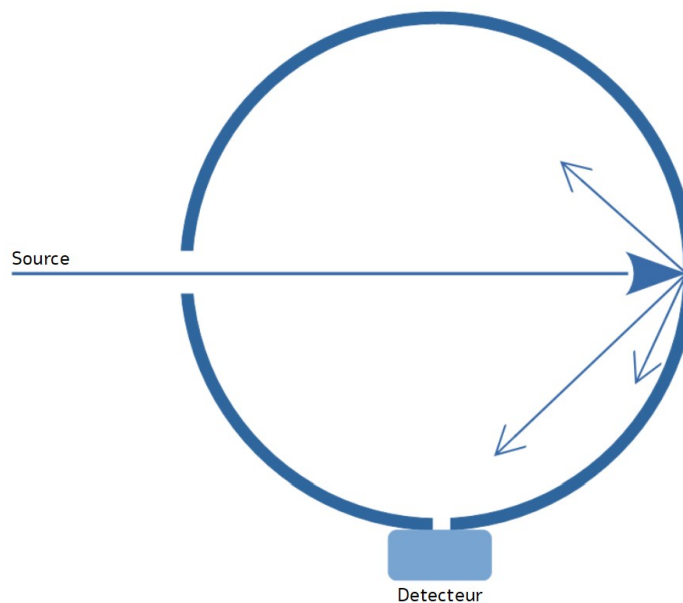


Figure 2 : Schéma explicatif de la sphère intégrante

Le fonctionnement d'une sphère intégrante consiste en l'intégration du flux radiant spatialement. Elle collecte un rayonnement électromagnétique d'une source lumineuse complètement externe sur l'appareil optique, généralement pour une mesure de flux ou une atténuation optique. Le rayonnement introduit dans la sphère frappe sur les parois réfléchives et se diffuse multiple par la réflexion. Le résultat du niveau de radiation intégré est proportionnel au niveau de radiation initiale et peut-être mesuré par un détecteur.

Afin de montrer cette explication schématiquement, comme nous pouvons le voir sur la figure ci-dessus, une source lumineuse est placée à l'entrée de la sphère. Son faisceau entre et se diffuse dans l'intégralité de la sphère de manière équivalente comme indiqué sur la figure. En sortie, le détecteur capte un faisceau uniforme qui pourra être analysé par le spectromètre.

La sphère intégrante conserve toute la puissance du faisceau mais ne garde pas l'information spatiale. La diffusion est complétée par deux mécanismes: La surface réfléchive lambertien et la forme géométrique de la sphère.

La sphère intégrante a un comportement lambertien. L'énergie incidente à une surface pénètre dans celle-ci et est réfléchié aléatoirement à l'intérieur de l'objet par de



microscopiques inhomogénéités du matériau. Au cours de ces multiples réflexions une partie de l'énergie incidente est ré-émise par la surface et ressort de l'objet suivant une direction aléatoire. Les réflexions multiples dans le matériau ne subissant aucune contrainte particulière, l'énergie est ré-émise de façon uniforme par la surface. L'intensité de l'énergie émise par un point est donc indépendante de la direction d'observation et uniquement fonction de la quantité d'énergie incidente tombant sur la surface. Cette quantité s'exprime comme un cosinus de l'angle entre la normale à la surface et la direction de la source."

En résumé, lors d'un comportement lambertien la luminance de l'objet ne change pas avec l'angle.

Passons maintenant à quelques calculs autour de la sphère.

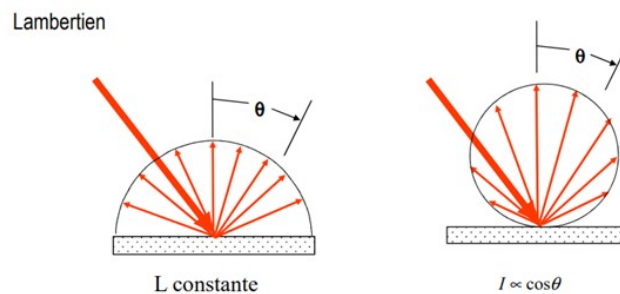


Figure 3 : Schéma du comportement lambertien d'un objet

Le schéma de gauche, ci-dessus, montre que la luminance  $L$  ne change pas selon l'angle tandis que le schéma de droite exprime l'intensité de la lumière qui, elle, évolue avec un changement d'angle.

On place un capteur  $S$  à une distance  $x$  d'une ouverture. On fait l'hypothèse que cette ouverture  $dA$  est très petite et que la lumière est émise par cette ouverture.

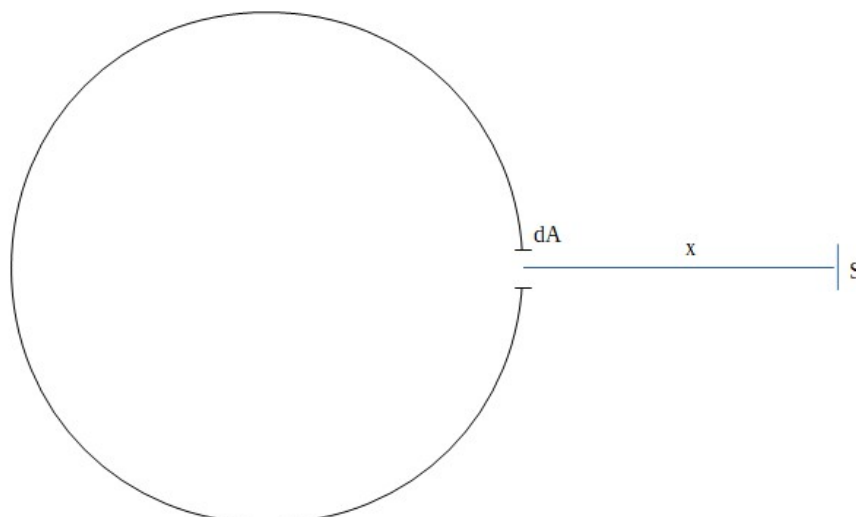


Figure 4 : Schéma situation 1

La puissance reçue par le capteur  $P_{re\cure}$  est la suivante:  
avec  $d\Omega$  l'angle solide, soit

$$P_{re\cure} = L_{sph\grave{e}re} dA d\Omega$$

$$P_{re\cure} = L_{sph\grave{e}re} dA S/x^2$$

On remarque que la puissance reçue est directement proportionnelle à la surface.  
En réalité, la lumière n'est pas émise par l'ouverture  $dA$  comme supposé précédemment mais elle est réfléchie dans la sphère sur une surface  $dS$  pour sortir par  $dA$ .

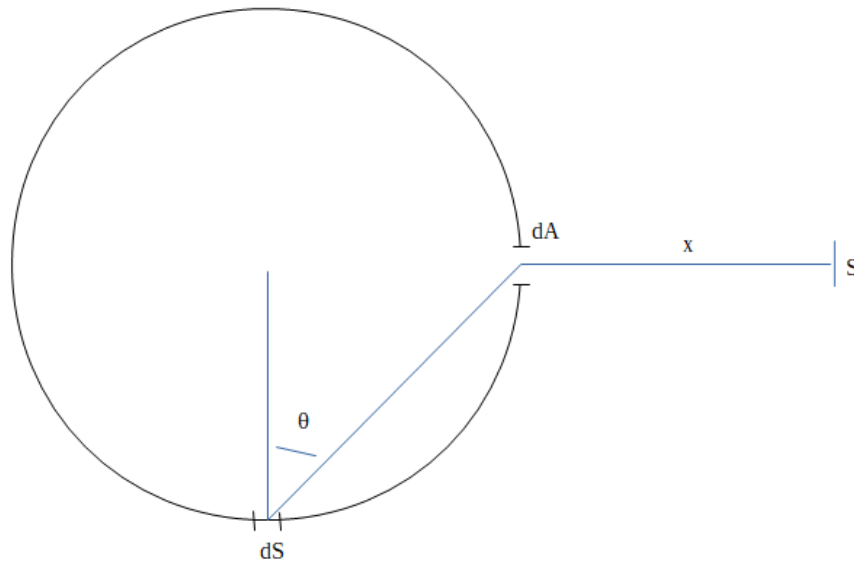


Figure 5 : Schéma situation 2

$$PdS \rightarrow dA = L \int \cos\theta \, dS \, d\Omega$$

Exprimons  $d\Omega$ :

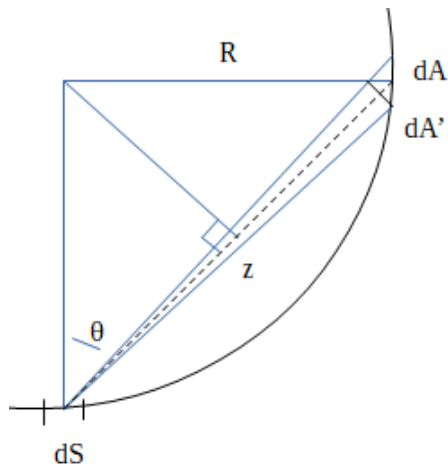


Figure 6 : Schéma situation 2 détaillée

$$d\Omega = \text{Surface} / \text{distance}^2 = dA' / z^2$$

Nous avons un triangle isocèle donc si nous le coupons en passant par le sommet et le centre de la face opposée nous obtenons deux triangles rectangles. Par le théorème de Pythagore, on trouve  $z/2 = R \cos\theta$  donc  $z = 2R \cos\theta$

Par le schéma, on trouve  $dA' = dA \cos\theta$

$$\text{Donc } PdS \rightarrow dA = L_{\text{int}} \cos\theta \, dS \, dA \cos\theta / (2R \cos\theta)^2$$

$$PdS \rightarrow dA = L_{\text{int}} \, dS \, dA / 4R^2$$

Ce calcul donne le résultat de la puissance reçue par  $dA$  venant d'une petite surface. En réalité  $dA$  ne reçoit pas la puissance d'une seule petite surface mais de toute la surface de la sphère. Il faut donc intégrer cette dernière expression par rapport à la surface pour obtenir la puissance totale.

$$P \rightarrow dA = [L_{\text{int}} \, dA / 4R^2] \int dS$$

$$P \rightarrow dA = L_{\text{int}} \, S \, dA / 4R^2$$

$$P \rightarrow dA = L_{\text{int}} \, 4\pi R^2 \, dA / 4R^2$$

$$P \rightarrow dA = L_{\text{int}} \, \pi \, dA$$

Dans cette expression de la puissance, on reconnaît l'émittance  $M = L_{\text{int}} \, \pi$

$$\text{Donc } M = L_{\text{int}} \, \pi = P \rightarrow dA / dA$$

Finalement, la puissance totale sortant par  $dA$  équivaut à la puissance sortant de toute la sphère.

### 3.1.2. Le spectromètre

- La Définition et le Fonctionnement :

Un spectromètre est un appareil optique qui capte les rayons lumineux d'une source, qui sont ensuite décomposés en leurs composantes spectrales. Ces composantes sont numérisées en fonction de la longueur d'onde, ce qui permet de lire le spectre électromagnétique sur un ordinateur.

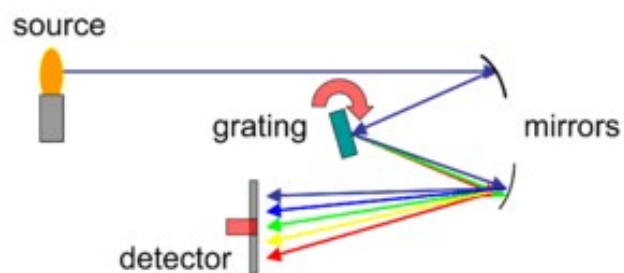
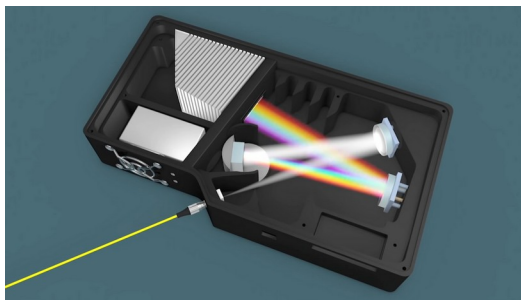


Figure 7 et 8 : Représentation d'un spectromètre et schéma de son fonctionnement

- Calibrage d'un spectromètre :

Le déroulement dans un spectromètre : La lumière passe par un filtre en entrant dans le dispositif, qui limite la largeur du rayon, puis est réfléchi sur un miroir, qui l'oriente vers une grille diffractante. Celle-ci sépare les photons par longueur d'onde, et les rayons obtenus sont focalisés par un second miroir vers un détecteur s'appelant capteur CCD, ce qui nous permet de visualiser le spectre de l'intensité de la lumière en fonction de la longueur d'onde.

Afin de faire une mesure en utilisant la sphère intégrante, il faut choisir le bon détecteur. La mesure spectrale a des résultats plus précis car il quantifie la distribution de la puissance spectrale de la source lumineuse. Nous pouvons définir la distribution de la puissance spectrale comme un graphique qui montre l'énergie de chaque longueur d'ondes

de lumière produite par une source lumineuse. Le spectromètre est connecté à la sphère intégrante et il mesure le niveau de signal intégré en lumen (lm).

Pour que les résultats du système spectromètre soient corrects, il faut bien réaliser le calibrage du spectromètre. Nous pouvons ainsi calibrer les spectromètres avec différentes méthodes.

- Calibrage de la longueur d'onde :

C'est l'une des méthodes les plus utilisées pour effectuer la calibration d'un spectromètre. La calibration de longueur d'onde est effectuée par le balayage à travers les angles de grille et la mesure du spectre avec les longueurs d'onde qui sont déjà connues. La longueur d'onde mesurée et celle qui est connue peuvent être comparées pour trouver la déviation. La méthode standard pour la calibration de longueur d'onde est la méthode de calibration de pic (calibration spectrale) qui définit la sensibilité de tous les pixels de l'instrument. L'importance de cette étape est de remplacer des numéros pixels au lieu de la longueur d'onde au long de l'axe x. Cette méthode consiste à détecter un spectre typiquement d'une émission atomique d'une source lumineuse d'Hélium (He) ou de Néon (Ne). L'utilisateur identifie deux ou plusieurs lignes d'émission connues avec des positions de pixel correspondantes et puis, interpole les données pour remplacer des éléments manquants entre les lignes de spectre connues.

- Calibrage de l'intensité :

L'objectif de la calibration de l'intensité est de calibrer l'axe y, en permettant le système spectromètre de détecter et d'analyser un échantillon ou une source de lumière indépendant de la réponse du système spectral. Selon l'Institut National des Normes et de la Technologie (NIST), tous les instruments possèdent une unique sensibilité spectrale en déterminant la forme spectrale et l'intensité absolue d'un seul échantillon, mais différent pour chaque instrument et même pour un seul instrument à des moments différents.

Afin d'illustrer cette observation, la même émission de source de lumière avait été obtenue en utilisant trois différents systèmes spectrométriques qui sont montrés sur la figure ci-dessous. Sans effectuer la calibration d'intensité, il est difficile de déterminer la bonne courbe car chaque spectre est le produit de l'émission d'une source de lumière et les composants du système interagissent avec le faisceau de lumière qui peuvent inclure des lentilles, des filtres, des réseaux de diffraction, des surfaces réfléchives et dans notre cas, des différents CCD détecteurs.

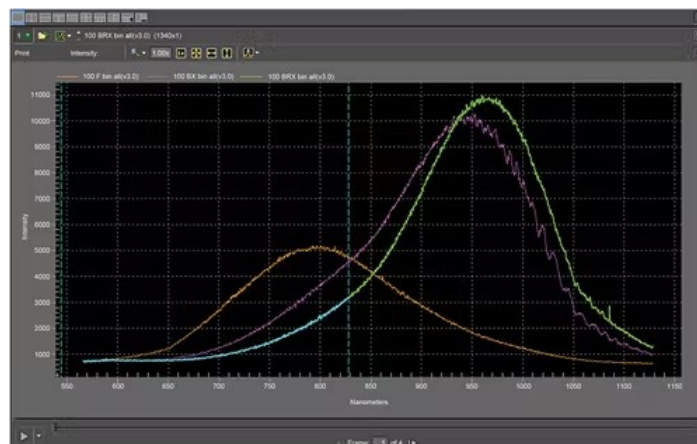


Figure 9 : Schéma d'un graphique montrant l'émission de source de lumière obtenue par trois différents systèmes spectrométriques

La calibration d'intensité est efficace pour éliminer la réponse spectrale des données échantillons. Le système de calibration d'intensité typique nécessite l'utilisation d'une lampe de calibration au quartz-tungstène-halogène (QTH), une alimentation régulée, une sphère intégrante pour l'illumination uniforme du système optique et plusieurs composants optiques.

Par ailleurs, la source lumineuse de calibration d'intensité fourni par une système de calibration qui contient des sources lumineuses de calibration de Hg/Ne émission atomique et basé de DEL avec une sphère intégrante encastré, permettant une calibration d'intensité relative automatisée de 400 nm à 1000 nm.

En général, l'utilisation des DEL sont plus préférés que celle des lampes QTH pour la calibration d'un spectromètre, car ils ont une durée de vie plus longue contrairement aux lampes QTH et de même, une stabilité améliorée des données de calibration qui permet une élimination convenable des rayonnements non souhaités.

- Calibrage avec un logiciel :

Après avoir fait la calibration de la longueur d'onde, la source lumineuse DEL est attachée à la fente d'entrée du spectrographe ou est positionnée sur l'échantillon. Après que la lampe ait été allumée et que la température ait été stabilisée, la source est prête pour la calibration d'intensité. A cette étape, l'utilisateur pourrait choisir d'effectuer la calibration par un logiciel.

Pendant la calibration, le logiciel utilise les données de calibration stockées dans la mémoire de la source lumineuse. Quand la calibration d'intensité est terminée, les signaux de balayage sont obtenus par la calibration d'intensité appliquée, ainsi la réponse du système est enlevée des données d'échantillon.

Pour clarifier cette explication, nous voudrions donner l'exemple suivant : Comme on peut voir sur la figure ci-dessous, cinq spectres sont collectés de la même source lumineuse avec deux spectrographes, deux différents capteurs CCD et la totalité de cinq différents réseaux de diffraction. La figure à gauche montre le spectre sans calibration d'intensité. Après que la calibration d'intensité est faite, les cinq spectres se rassemblent complètement et forment un seul spectre, car la réponse d'instrument a été enlevée des données de spectres par le logiciel.

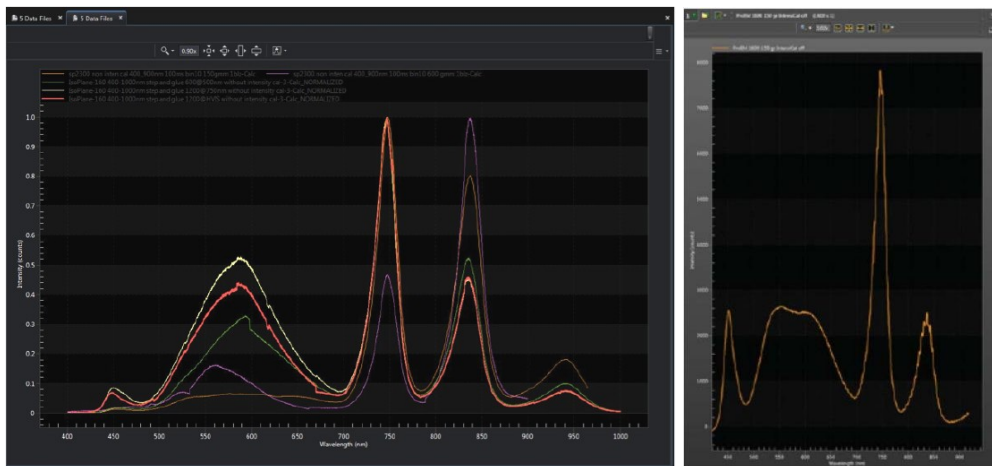


Figure 10 : Schéma explicatif de la calibration d'intensité

## 3.2. Expériences

### 3.2.1. Analyse du calibrage d'un appareil photo

Il existe plusieurs applications de la sphère intégrante (voir annexes). Nous avons donc décidé d'apporter une application concrète et de la vie quotidienne à notre projet par le biais d'une expérience. Notre choix s'est porté sur l'étude d'un appareil photo pour notre expérience ; le but étant de vérifier le calibrage de ce dernier.

Pour cela, nous avons effectué plusieurs manipulations pour tester chaque paramètre indépendamment. Nous avons modifié deux paramètres essentiels: l'ouverture, qui correspond au diamètre d'ouverture du diaphragme de l'appareil au déclenchement, et le temps de pose, qui représente la durée pendant laquelle le capteur numérique est exposé à la lumière lors de la capture de la photo. Pendant l'intégralité de notre expérience, nous avons placé l'appareil photo de telle manière à ce que l'extrémité du zoom soit à 22.5 cm du port de la sphère, et le capteur environ à 35 cm. De même, nous avons gardé fixe le degré de zoom, l'intensité de la lumière émise par la lampe de la sphère, la sensibilité ISO que nous avons fixée à 100, et nous avons fait le choix de configurer l'appareil photo en niveaux de gris.

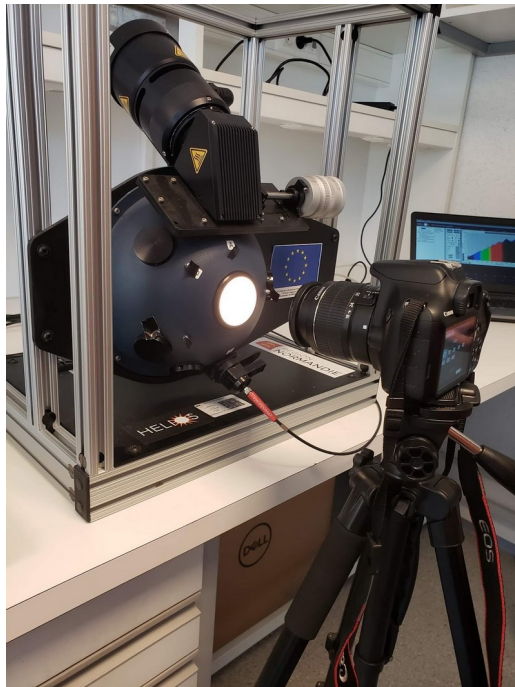


Figure 11 : Photo du montage

#### Quelques précisions sur les notations :

L'ouverture de l'appareil photo correspond au rapport suivant :

$$f = \text{distance focale} / \text{diamètre d'ouverture}$$

Lorsque l'on note une ouverture F9, ce rapport est égal à 9 et on peut donc utiliser cette information pour tenter de récupérer le diamètre d'ouverture.

Plus le f est petit, plus l'ouverture du diaphragme est grande.

Le temps de pose représente le temps pendant lequel le capteur reste ouvert avant de capturer la photo. Le rapport 1/10 représente donc un temps d'ouverture d'un dixième de seconde par exemple.



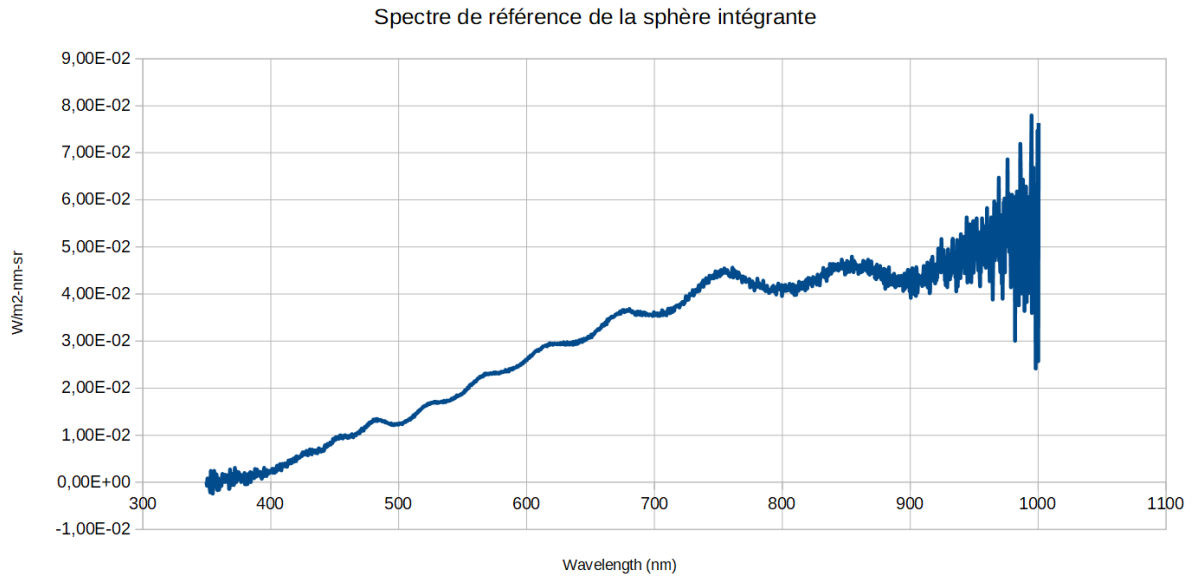


Figure 12 : Spectre de référence de la sphère intégrante utilisée pour nos expériences

Manipulations :

Dans un premier temps, nous avons fixé le temps de pose de l'appareil à 1/40 et avons fait varier l'ouverture sur 6 photos (voir annexes), respectivement F6.3, F7.1, F8, F9, F10, F11. A l'aide du logiciel GIMP, nous avons centré et découpé les photos, puis nous les avons analysées grâce à quelques lignes de codes en Python sur l'interface Jupyter Notebook (voir annexes). L'analyse permet de visualiser le niveau de rouge, vert ou bleu des pixels du diamètre horizontal de l'image. Puisque les photos ont été prises en niveaux de gris, on observe que les profils en vert, rouge et bleu sont identiques (annexes) ; nous avons donc décidé de n'analyser que le profil en bleu. On observe d'abord le profil seul, afin de chercher toute asymétrie qui résulterait d'une distorsion spatiale par l'appareil ; puis on compare les profils des différentes photos entre eux ; et enfin on trace le graphique de l'évolution de la moyenne de niveau de bleu en fonction du diamètre d'ouverture (en mm) et donc d'exposition lors de la prise de la photo.

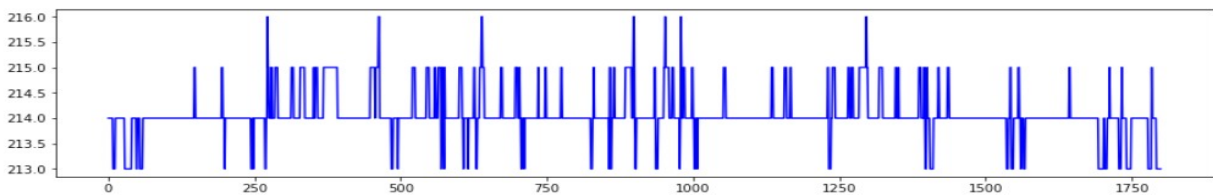


Figure 13 : Exemple de profil de niveau en bleu sur la ligne horizontale de l'image pour F6.3

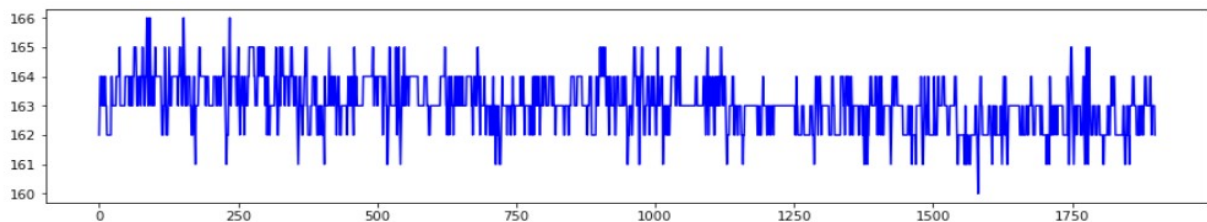


Figure 14 : Exemple de profil de niveau en bleu sur la ligne horizontale de l'image pour F11

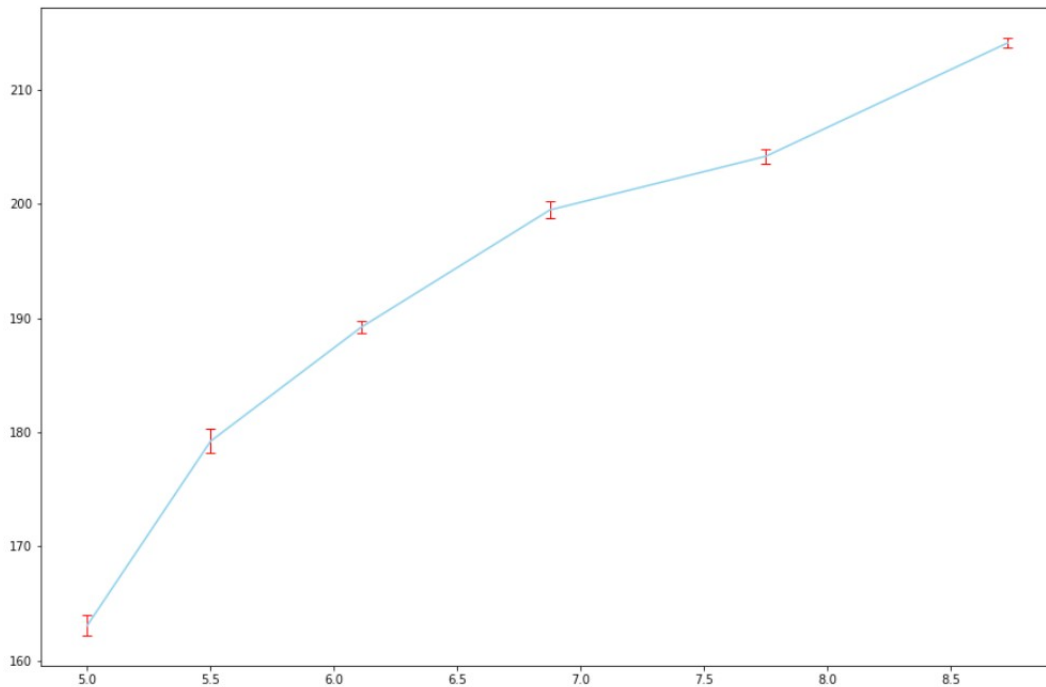


Figure 15 : Evolution de la moyenne de niveau de bleu en fonction du diamètre d'ouverture (les incertitudes représentent les écart-types des valeurs sur les différentes photos)

Dans un second temps, nous avons fixé l'ouverture de l'appareil à F9 et avons fait varier son temps de pose sur 6 photos, respectivement 1/10, 1/20, 1/30, 1/40, 1/50 et 1/60. Nous répétons alors la découpe sur GIMP, l'obtention du profil de bleu, et l'analyse et la comparaison des profils. On effectue cette fois-ci le graphique des moyennes en fonction du temps en secondes.

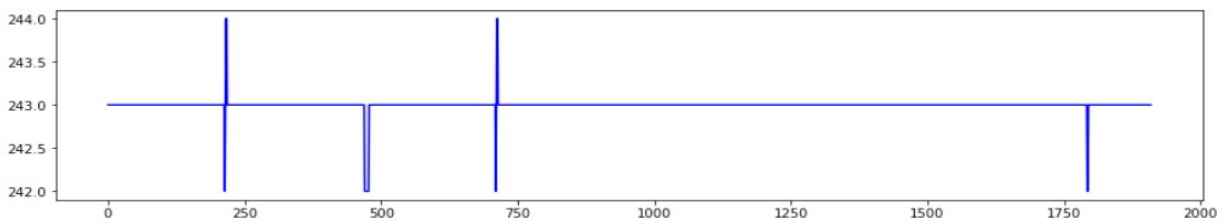


Figure 16 : Exemple de profil de niveau en bleu sur la ligne horizontale de l'image pour 1/10

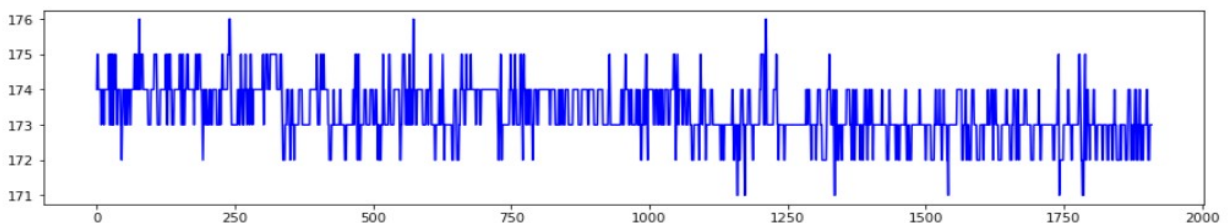


Figure 17 : Exemple de profil de niveau en bleu sur la ligne horizontale de l'image pour 1/50



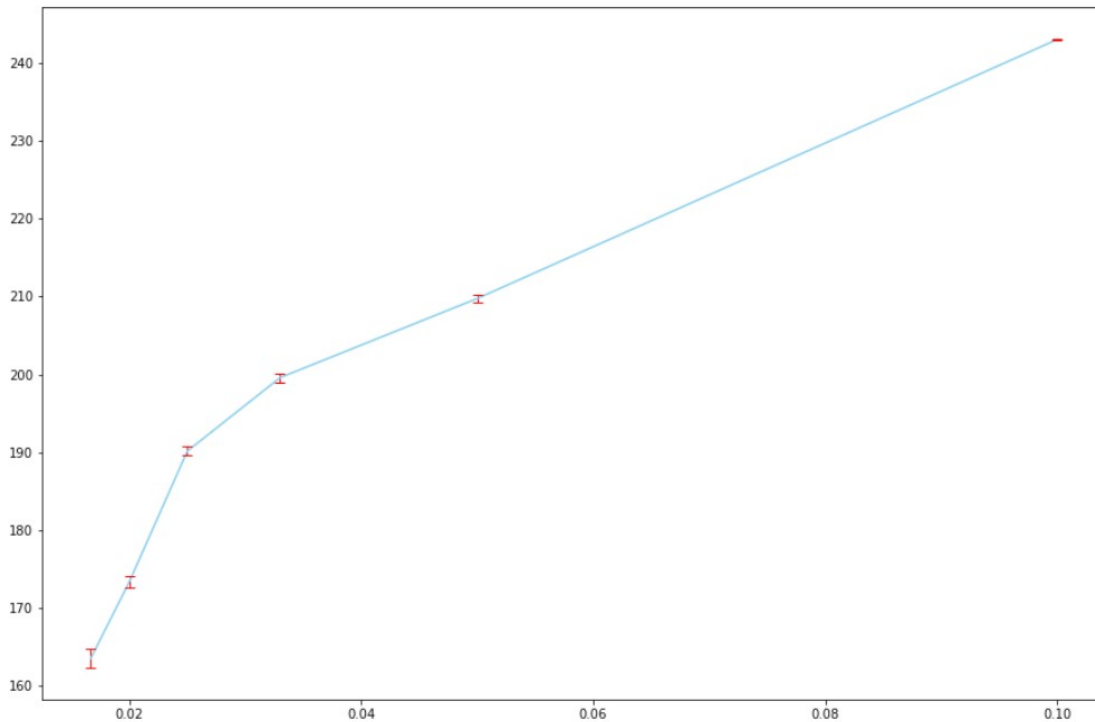


Figure 18 : Evolution de la moyenne de niveau de bleu en fonction du temps de pause (les incertitudes représentent les écart-types des valeurs sur les différentes photos)

Nous observons d'abord que l'appareil n'effectue pas de distorsion spatiale : aucune déviation n'est en effet visible sur les profils de bleu. Ensuite, qu'en prenant en compte les incertitudes dues à nos manipulations, les deux courbes des moyennes peuvent être assimilées à des modèles linéaires, ce qui est rassurant car dans la théorie il est évident que la lumière captée est proportionnelle au temps et à la surface d'ouverture. Les écart-types deviennent également plus grands - et donc les incertitudes - lorsque le temps ou le diamètre diminue, car il y a plus de bruit sur les images, l'appareil est logiquement moins performant. Nous pouvons en conclure que l'appareil photo est correctement réglé : la lumière est presque traitée de manière aussi uniforme qu'à la sortie de la sphère.

### 3.2.2. Analyse de filtres

Pour notre deuxième expérimentation, nous avons fixé le temps de pose à 1/40 et l'ouverture à 9. Nous avons ensuite sorti de son branchement la fibre optique qui captait jusqu'ici la lumière à l'intérieur de la sphère, puis nous l'avons placée à l'entrée du port devant lequel nous prenions nos photos. Nous avons ainsi obtenu un spectre qui perd légèrement en amplitude (annexes). Enfin, nous avons placé entre la sphère et la fibre des filtres, respectivement de longueurs d'onde 480, 580 et 640 nm et qui correspondent donc aux couleurs rouge, vert et bleu du domaine du visible. Nous obtenons grâce au spectromètre le spectre de la lumière après passage à travers les filtres, puis nous récupérons la valeur maximale des spectres dans le domaine visible et enfin nous effectuons le rapport entre l'amplitude des longueurs d'ondes captées et celles de références. Nous espérons ainsi vérifier que le filtre laisse bien passer les longueurs d'ondes prévues, avec quelle imprécision et si la longueur d'onde passe bien dans son entièreté.

[plot bleu]		[plot vert]		[plot rouge]	
Wavelength (nm)	W/m2-nm-sr	Wavelength (nm)	W/m2-nm-sr	Wavelength (nm)	W/m2-nm-sr
349,702512	4,79E-05	349,702512	4,79E-05	349,702512	4,79E-05
350,080469	-0,000752	350,080469	-0,002355	350,080469	-0,002355
350,458394	4,69E-05	350,458394	0,000822	350,458394	0,000822
350,836285	-0,001584	350,836285	-0,000767	350,836285	-0,000767
351,214143	4,73E-05	351,214143	0,000819	351,214143	0,000819
351,591968	4,76E-05	351,591968	0,000824	351,591968	0,000824
351,96976	-0,000729	351,96976	-0,000729	351,96976	-0,000729
352,347519	-0,003067	352,347519	-0,003067	352,347519	-0,003067
352,725245	-0,002194	352,725245	-0,002194	352,725245	-0,002194
353,102938	0,000843	353,102938	0,000843	353,102938	0,000843
353,480598	0,001603	353,480598	0,000825	353,480598	0,000825
353,858224	4,67E-05	353,858224	4,67E-05	353,858224	4,67E-05
354,235818	-0,001401	354,235818	-0,002123	354,235818	-0,002123
354,613378	-0,001601	354,613378	-0,001601	354,613378	-0,001601
354,990905	-0,001536	354,990905	-0,000744	354,990905	-0,000744
355,368399	0,000846	355,368399	-0,00075	355,368399	-0,00075
355,74586	0,000846	355,74586	0,000846	355,74586	0,000846
356,123287	-0,001649	356,123287	-0,001649	356,123287	-0,001649

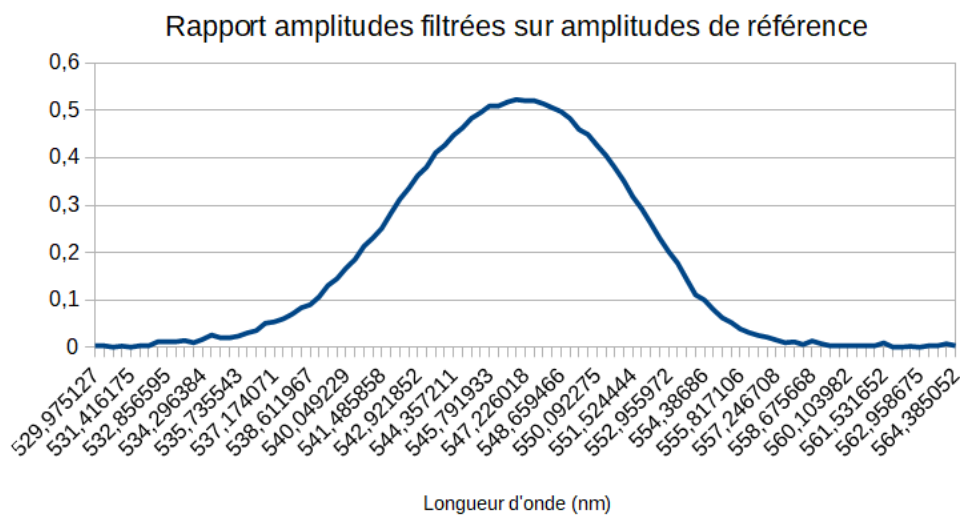
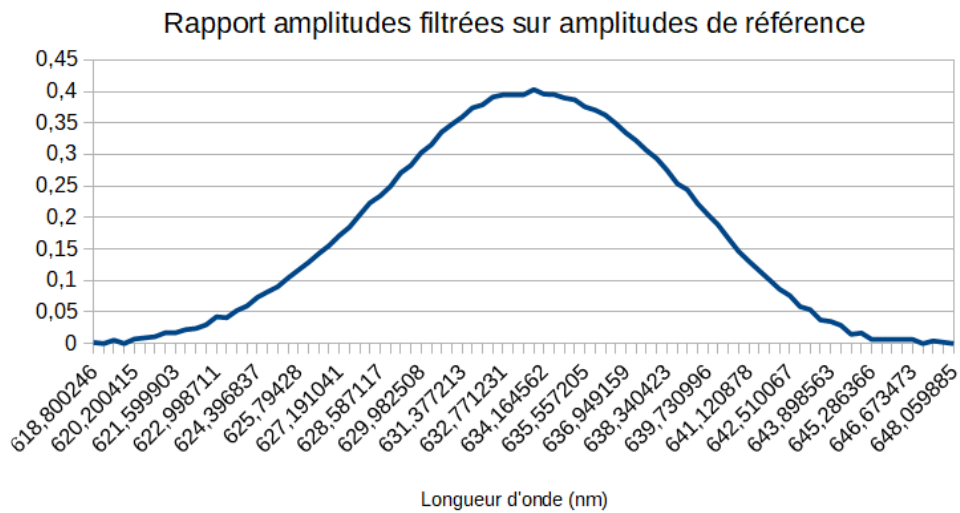
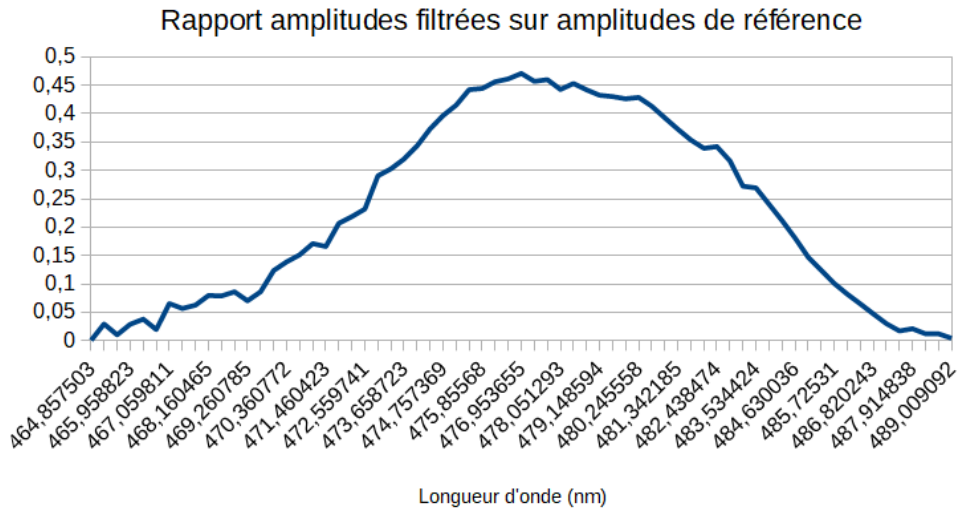
Figure 19 : Exemple des tableaux rassemblant les données des spectres de la lumière après passage par les filtres

Nous obtenons comme points culminants les valeurs respectives de 476,953655 nm, 548,301164 nm et 634,512788 nm pour les filtres bleu, vert et rouge. Cela confirme les données communiquées par le fabricant car les boîtiers des filtres précisent que l'incertitude est de 10 nm. On observe cependant sur les graphiques suivants, qui représentent le pourcentage de lumière qui passe le filtre, que moins de 60% de la lumière passe réellement par le filtre à la longueur d'onde choisie, ce qui est assez peu.



Figure 20 : Boîtiers des filtres avec leurs caractéristiques

Cette étude de filtre nous permet de conclure sur la qualité des filtres. La longueur d'onde passant est celle donnée par le fabricant mais le filtre laisse passer la moitié de ce qu'il est supposé transmettre. En conclusion, le filtre n'est pas de très bonne qualité.



Figures 21, 22 et 23 : Rapports respectifs des amplitudes filtrées par les filtres bleu, rouge et vert sur les amplitudes de références

#### 4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

En conclusion, ce projet sur un semestre complet nous a apporté de nouvelles connaissances et une approche différente sur l'apprentissage que nous suivons à l'INSA. Tout d'abord, le sujet même de ce projet nous a forcé à effectuer beaucoup de recherches car les dispositifs étudiés ne sont pas des équipements que nous avons pu manipuler jusqu'alors. Nous avons été amenées à chercher et consulter des publications scientifiques complexes pour comprendre le fonctionnement et les applications de la sphère et du spectromètre, ce qui nous a entraîné de manière générale pour de futurs projets.

Nous avons pu de plus entraîner sur le long terme nos capacités de travail en groupe, comme la communication, la gestion du temps et la séparation des tâches, dans le but d'être le plus efficace possible et d'organiser correctement notre travail. Les différents membres de notre groupe n'ayant pas choisis les mêmes pré-spécialisations, nous avons pu exploiter nos compétences de manières diverses, dans la compréhension du phénomène physique qui s'effectue dans la sphère comme dans l'exploitation informatique des résultats de notre expérimentation ; tout cela en grande autonomie et avec la contrainte de régularité imposée par le suivi du projet.

La mise en pratique de nos connaissances et de nos recherches lors de notre manipulation nous a aidé à visualiser des concepts étudiés en cours. Cela a apporté un côté ludique à notre projet et nous a permis d'expérimenter un exemple de la vie courante. Nous notons qu'il aurait été intéressant d'expérimenter d'autres applications de la sphère.

Il est crucial pour un futur ingénieur de savoir fonctionner en groupe, dans le but d'avancer, d'innover et d'évoluer. Ce projet aura donc constitué une mise en situation idéale du mode de réflexion et de travail dans le monde de l'ingénierie.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

- MKS Instruments, “Integrating Sphere Fundamentals and Applications”, consulté le 11/03/2022 :  
<https://www.newport.com/t/integrating-sphere-fundamentals-and-applications>
- Tektronix, “Measuring Laser Diode Optical Power with an Integrating Sphere”, consulté le 25/03/2022 :  
[https://download.tek.com/document/IntegratingSphere\\_Whitepaper.pdf](https://download.tek.com/document/IntegratingSphere_Whitepaper.pdf)
- Labsphere, “Reflectance and Transmittance Measurement, Integrating Spheres”, consulté le 25/03/2022 :  
[https://research.engineering.ucdavis.edu/woodall/wp-content/uploads/sites/84/2016/02/labsphere\\_reflectance\\_manual.pdf](https://research.engineering.ucdavis.edu/woodall/wp-content/uploads/sites/84/2016/02/labsphere_reflectance_manual.pdf)
- Ali Hamada Fakra, Blázquez Recio Alfonso José, Nour Murad, Jean Claude Gatina, “A new affordable and quick experimental device for measuring the thermo-optical properties of translucent construction materials”, Journal of Building Engineering, Elsevier, 2020, consulté le 25/03/2022 :  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02937976/document>
- Ocean Insight, “How does a Spectrometer works”, consultée le 11/03/2022 :  
<https://www.youtube.com/watch?v=OI3plvLhVcc>
- CI Systems, “Integrating Sphere”, consulté le 18/03/2022 :  
<https://www.ci-systems.com/integrating-sphere>
- SphereOptics Hoffman-LLC, “Integrating Sphere, Design and Applications”, consulté le 25/03/2022 :  
[https://www.physics.muni.cz/~jancely/PPL/Texty/IntegracniKoule/Integrating%20sphere\\_technical\\_guide.pdf](https://www.physics.muni.cz/~jancely/PPL/Texty/IntegracniKoule/Integrating%20sphere_technical_guide.pdf)
- Shimadzu, “Integrating Spheres”, consulté le 18/03/2022 :  
<https://www.shimadzu.com/an/service-support/technical-support/analysis-basics/fundamentals-uv/integratingspheres.html>
- Labsphere, “Integrating Sphere, Theory and Applications”, consulté le 25/03/2022 :  
<https://labsphere.com/wp-content/uploads/2021/09/Integrating-Sphere-Theory-and-Applications.pdf>
- Institut d'Optique Graduate School, “TP de Photométrie – Sphère intégrante”, consulté le 11/03/2022 :  
<http://paristech.institutoptique.fr/site.php?id=818&fileid=9305>
- Pike Technologies, “Integrating Spheres – Introduction and Theory”, consulté le 25/03/2022 :  
<http://www.piketech.com/files/pdfs/IntSpheresAN611.pdf>

- Michael Case, “Spectrometers: Spectroscopic calibration uses LEDs and nonlinear optimization”, consulté le 16/03/2022 :  
<https://www.laserfocusworld.com/test-measurement/spectroscopy/article/16546930/spectrometers-spectroscopic-calibration-uses-leds-and-nonlinear-optimization>
- Gert-Jan Swinkels, Silke Hemming, Vida Mohammadkhani, Jim van Ruijven, “Protocol for measuring light transmission of horticultural screens”, consulté le 25/03/2022 :  
<https://edepot.wur.nl/286023>
- Hibiki M. Noda, Takeshi Motohka, Kazutaka Murakami, Hiroyuki Muraoka, Kenlo Nishida Nasahara, “Accurate measurement of optical properties of narrow leaves and conifer needles with a typical integrating sphere and spectroradiometer”, consulté le 25/03/2022 :  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/pce.12100>
- Etienne Laliberté, Université de Montréal, “Measuring spectral reflectance and transmittance (350-2500 nm) of large leaves using an integrating sphere V.2”, consulté le 25/03/2022 :  
[https://www.protocols.io/view/measuring-spectral-reflectance-and-transmittance-3-q26g7e5klwz1/v2?version\\_warning=no](https://www.protocols.io/view/measuring-spectral-reflectance-and-transmittance-3-q26g7e5klwz1/v2?version_warning=no)
- M Hammer, A Roggan, D Schweitzer and G Müller, “Optical properties of ocular fundus tissues-an in vitro study using the double-integrating-sphere technique and inverse Monte Carlo simulation”, consulté le 25/03/2022 :  
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.470.5204&rep=rep1&type=pdf>
- John W. Pickering, Scott A. Prahl, Niek van Wieringen, Johan F. Beek, Henricus J. C. M. Sterenborg, and Martin J. C. van Gemert, “Double-integrating-sphere system for measuring the optical properties of tissue”, consulté le 25/03/2022 :  
[https://www.researchgate.net/publication/46037006\\_A\\_double\\_integrating\\_sphere\\_system\\_to\\_measure\\_optical\\_properties\\_of\\_tissue](https://www.researchgate.net/publication/46037006_A_double_integrating_sphere_system_to_measure_optical_properties_of_tissue)
- Leonard M. Hanssen and Keith A. Snail, “Integrating Spheres for Mid- and Near-infrared Reflection Spectroscopy”, consulté le 25/03/2022 :  
[https://tsapps.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=841543](https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=841543)
- W E Sumpner, 1892, Proc. Phys. Soc. London, “The Diffusion of Light”, article en ligne consulté le 25/03/2022 :  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1478-7814/12/1/304/pdf>
- Article de Romain Boileau, consulté sur le blog “Apprendre le cinéma”, le 05/06/2022 :  
<https://apprendre-le-cinema.fr/louverture-en-photo/>

## 6. ANNEXES

### 6.1. Schémas de différentes utilisations d'une sphère intégrante

Les schémas suivants ont été tirés du site internet "Integrating Sphere Fundamentals and Applications" de l'entreprise Newport, dont le lien est disponible dans notre bibliographie. Ils décrivent succinctement différentes utilisations d'une sphère intégrante, que nous n'avons pas développées expérimentalement au cours de notre projet.

#### 6.1.1. Mesure de la puissance d'une source lumineuse divergente

Une source divergente est placée directement dans le port d'entrée et un déflecteur empêche un éclairage direct entre la source et le détecteur. Dans une sphère intégrante, le flux détecté est toujours une petite fraction du flux incident. Cette atténuation, causée par la réflexion de la lumière plusieurs fois avant d'atteindre le détecteur, fait de la sphère d'intégration un outil idéal pour la mesure de la puissance lumineuse de sortie des lasers à haute puissance.

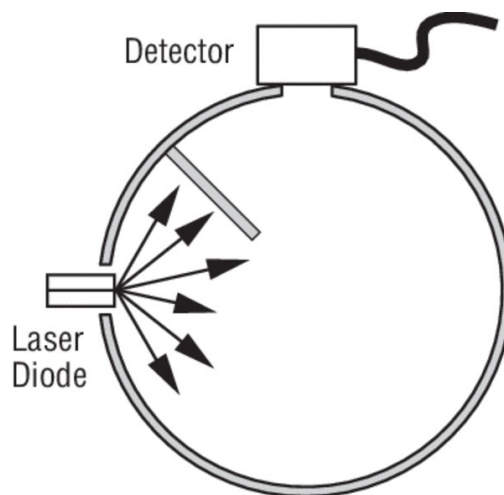


Figure 24 : Source lumineuse divergente

#### 6.1.2. Mesure de la puissance d'un faisceau laser

Un faisceau pénètre la sphère suivant son diamètre, forme un point chaud en touchant la paroi puis se réfléchit dans toutes les directions. Un détecteur est placé à angle droit du premier rayon, et un déflecteur empêche le rayonnement direct du point chaud de frapper le capteur de lumière. On effectue ainsi la mesure de puissance du faisceau intégrée dans l'espace.

Une sphère intégrante combinée avec un photodétecteur est une solution simple pour la mesure de la puissance totale des lasers, qu'ils aient des faisceaux collimatés ou divergents comme par exemple des stacks de diodes lasers ou encore des diodes lasers fibrées. A cause de leur divergence, de leur taille de faisceau ou même de leur puissance certaines sources lasers sont très difficilement mesurables avec un puissance-mètre traditionnel. La sphère intégrante permet d'englober toute la puissance émise et simplifie l'alignement avec la source à mesurer.



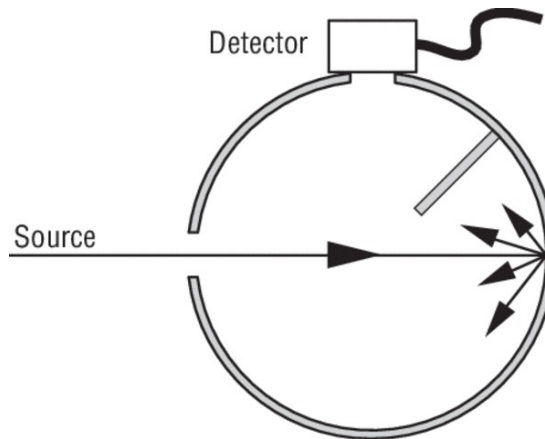


Figure 25 : Faisceau laser

### 6.1.3. Mesure de la puissance de sortie d'une fibre optique

La sortie typique d'une fibre optique diverge lentement, et en conséquent le premier point de réflexion du côté opposé de la source n'est pas très concentré. Cela rend possible soit la configuration collimatée autant que la configuration divergente.

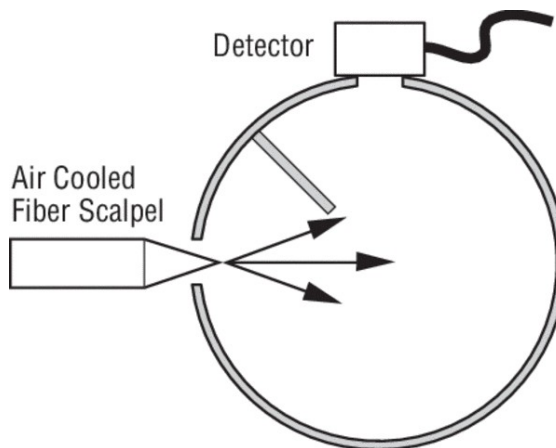


Figure 26 : Fibre optique

### 6.1.4. Mesure de la transmittance

On place un échantillon dans un port, face à un piège à lumière. Le piège à lumière sert à retirer les composants non dispersés. L'échantillon est ensuite irradié, puis comparé à une mesure de source directe effectuée en dehors de la sphère. Un déflecteur protège le détecteur contre la transmission non intégrée.

On collecte ainsi le rayonnement transmis de l'échantillon. Il est également possible de mesurer la diffusion totale intégrée, la fluorescence, la diffusion en vrac et la diffusion en avant et en arrière.



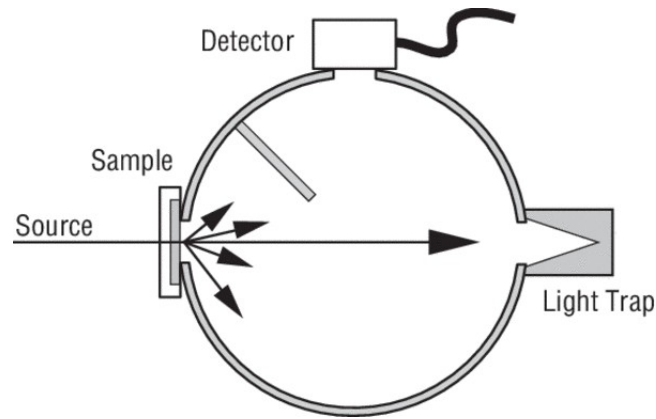


Figure 27 : Transmittance

### 6.1.5. Mesure de la réflectance

Une source pénètre la sphère et frappe un échantillon orienté. Le rayonnement total réfléchi est intégré dans l'espace par la sphère et mesuré par un détecteur, toujours protégé d'un rayonnement direct.

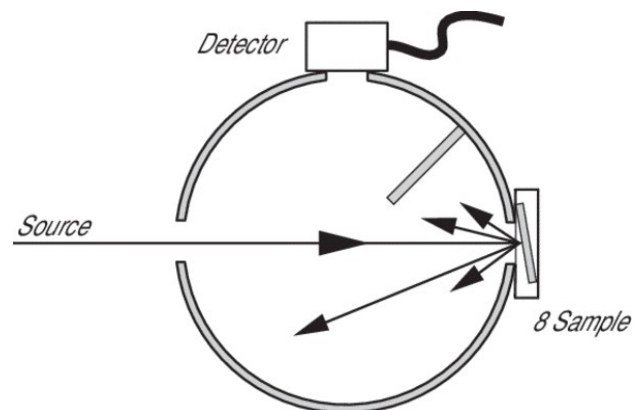


Figure 28 : Réflectance

## 6.2. Photos et graphiques de notre manipulation

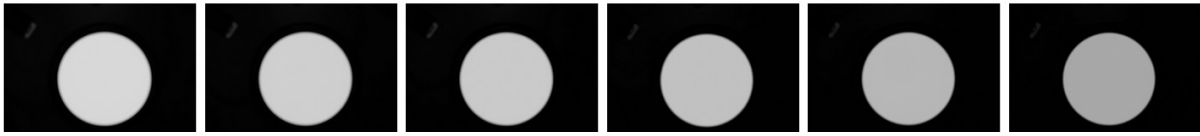


Figure 29 : Photos originelles avec temps de pose fixe



Figure 30 : Photos utilisées pour faire le profil

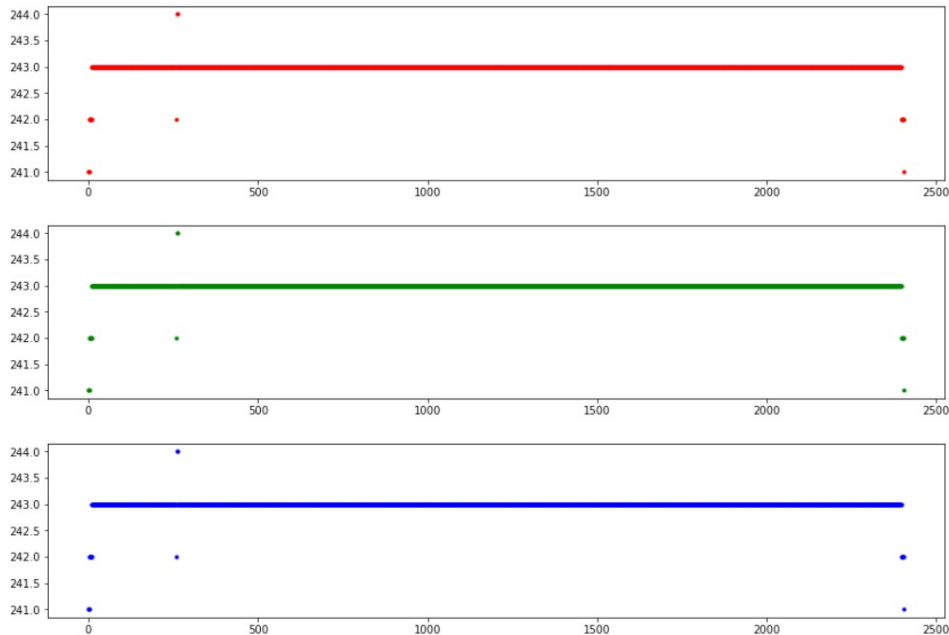


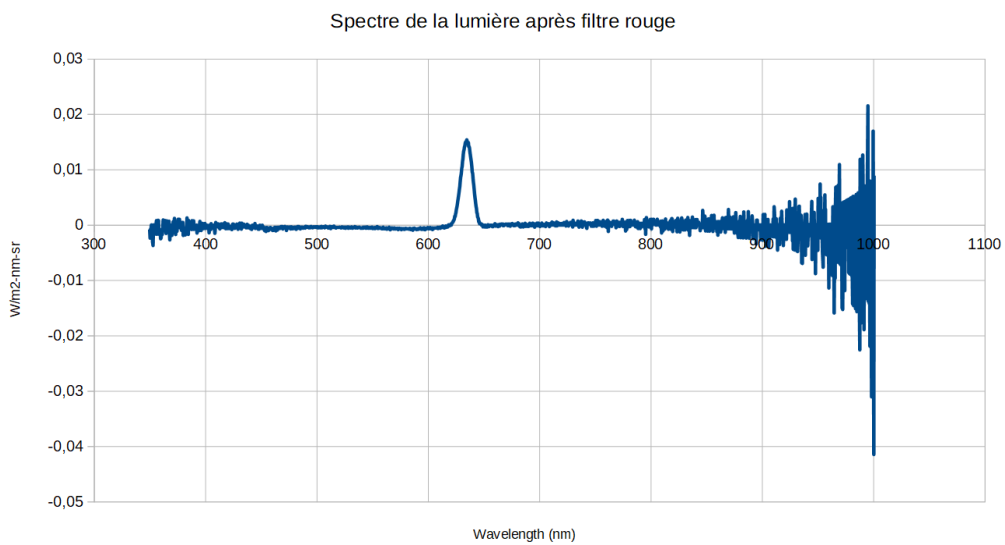
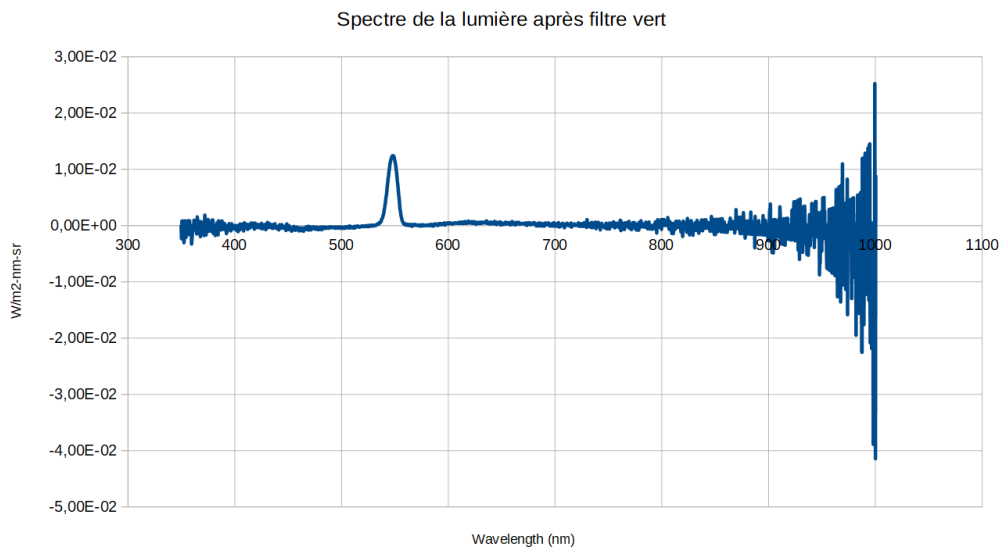
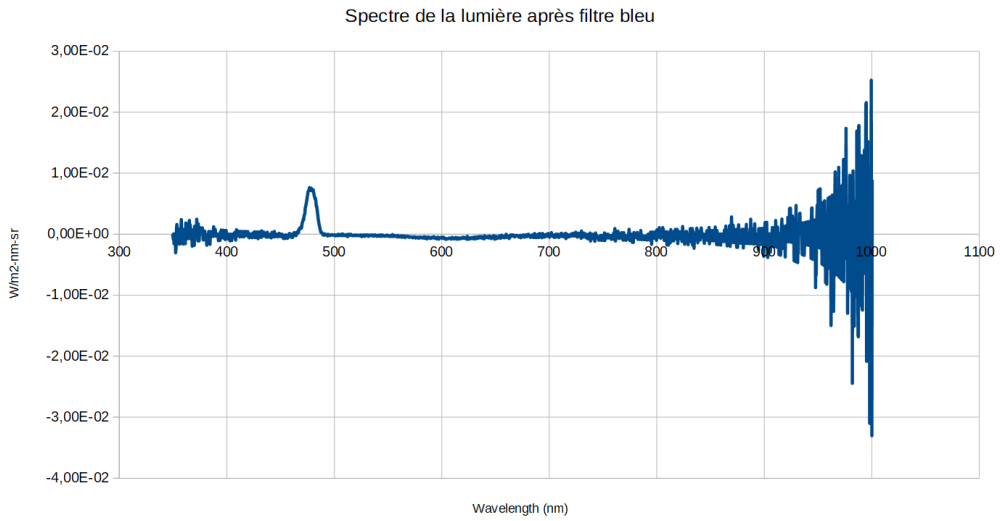
Figure 31 : Profils identiques des niveaux de rouge, vert et bleu pour une image en F9 et 1/10 (en niveau de gris)



Figure 32 : photos originelles avec ouverture fixe



Figure 33 : Photos utilisées pour faire le profil



*Figures 34, 35 et 36 : Graphiques représentant les spectres après passage de la lumière de la sphère intégrante par des filtres de respectivement 480, 580 et 640 nm*

### 6.3. Code python utilisé pour récupérer et analyser les profils en bleu des différentes images

```
import imageio
import numpy
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.pyplot import *

img1 = imread("Documents/TP Appareil photo/Sans filtre/Même Ouverture F9/TP 1 sur 10 - crop.jpeg")

bleu1 = img1[:, :, 2]

ligneMilieuB1 = bleu1[502, 250:2100]

figure(figsize=(15, 3))
plot(ligneMilieuB1, 'b-')
```

Figure 37 : Code permettant d'obtenir le profil du niveau de bleu d'une image

```
import imageio
import numpy
import matplotlib.pyplot as plt

img1 = imread("Documents/TP Appareil photo/Sans filtre/Même Ouverture F9/TP 1 sur 10 - crop.jpeg")
img2 = imread("Documents/TP Appareil photo/Sans filtre/Même Ouverture F9/TP 1 sur 20 - crop.jpeg")
img3 = imread("Documents/TP Appareil photo/Sans filtre/Même Ouverture F9/TP 1 sur 30 - crop.jpeg")
img4 = imread("Documents/TP Appareil photo/Sans filtre/Même Ouverture F9/TP 1 sur 40 - crop.jpeg")
img5 = imread("Documents/TP Appareil photo/Sans filtre/Même Ouverture F9/TP 1 sur 50 - crop.jpeg")
img6 = imread("Documents/TP Appareil photo/Sans filtre/Même Ouverture F9/TP 1 sur 60 - crop.jpeg")

x1 = np.array([0.1, 0.05, 0.033, 0.025, 0.02, 0.01667])

bleu1 = img1[:, :, 2]
bleu2 = img2[:, :, 2]
bleu3 = img3[:, :, 2]
bleu4 = img4[:, :, 2]
bleu5 = img5[:, :, 2]
bleu6 = img6[:, :, 2]

ligneMilieuB1 = bleu1[502, 250:2100]
ligneMilieuB2 = bleu2[502, 250:2100]
ligneMilieuB3 = bleu3[502, 250:2100]
ligneMilieuB4 = bleu4[502, 250:2100]
ligneMilieuB5 = bleu5[502, 250:2100]
ligneMilieuB6 = bleu6[502, 250:2100]

moy = np.zeros(6)
std = np.zeros(6)
moy[0] = np.mean(ligneMilieuB1)
std[0] = np.std(ligneMilieuB1)
moy[1] = np.mean(ligneMilieuB2)
std[1] = np.std(ligneMilieuB2)
moy[2] = np.mean(ligneMilieuB3)
std[2] = np.std(ligneMilieuB3)
moy[3] = np.mean(ligneMilieuB4)
std[3] = np.std(ligneMilieuB4)
moy[4] = np.mean(ligneMilieuB5)
std[4] = np.std(ligneMilieuB5)
moy[5] = np.mean(ligneMilieuB6)
std[5] = np.std(ligneMilieuB6)

values = moy
errorValues = std

plt.figure(figsize=[15, 10])
plt.plot(x1, values, color = 'skyblue')
plt.errorbar(x1, values, yerr = errorValues,
             fmt = 'none', capsize = 4, ecolor = 'red', elinewidth = 1, capthick = 1)
```

Figure 38 : Code permettant d'obtenir la courbe des moyennes de la série de 6 photos avec les écarts-types comme incertitudes