

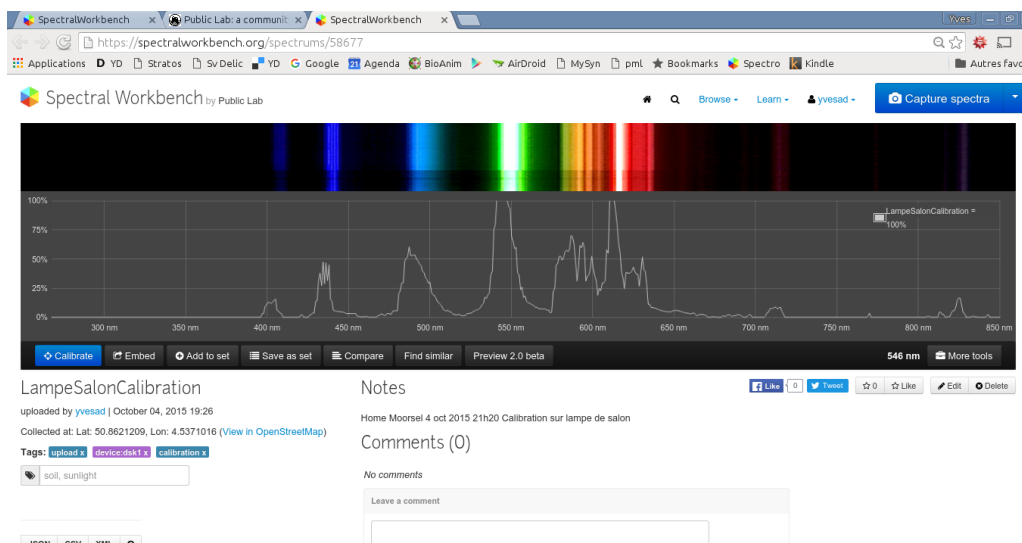
# Construction et utilisation d'un spectromètre optique bon marché

Yves A. Delhaye

16 mars 2016 10 :21

## Résumé

Fiche de ressources pour construire et utiliser un spectromètre optique très bon marché (< 20 euros) à partir d'une webcam et d'un DVD. Il est possible de projeter le spectre ET DE L'ANALYSER en direct grâce à un logiciel open-source.



## Sommaire

<b>1 Le spectromètre</b>	<b>2</b>
<b>2 Le logiciel</b>	<b>6</b>
<b>3 Exemples de spectres</b>	<b>15</b>
<b>4 Quelques points pour aller plus loin</b>	<b>18</b>

---

## Introduction

---

Nous allons décrire l'utilisation d'un spectromètre optique permettant (entre autres) de montrer la décomposition de la lumière visible en ses différentes composantes (au sens de couleurs). Le dispositif fournit la possibilité d'afficher le spectre observé sur un écran d'ordinateur (et donc de le projeter aussi sur un grand écran pour toute une classe).

Le spectre est affiché en direct (en "live"), en vraies<sup>1</sup> couleurs et est accompagné d'un graphique de l'intensité lumineuse (en % par rapport à la saturation des capteurs) en fonction de la longueur d'onde. Le graphique est lui aussi visible en "live" et on peut le calibrer.

Les images et les spectres obtenus peuvent être enregistrés.

Le matériel peut être obtenu en kit pour une somme modique. Mais les plans sont librement téléchargeables et le montage ne demande que d'être un peu bricoleur. Dans les deux cas, il faut toujours faire l'assemblage soi-même.

Il existe des spectromètres optiques vendus par les firmes de matériel pédagogique ( $\simeq$  1000 euros). Certains affichent des fausses couleurs dans le spectre pour visualiser le lien entre couleur et longueur d'onde.

La démarche discutée ici a été appliquée et testée dans des écoles, elle est aussi tout fait transposable dans des contextes de stages ou d'animations.

Nous avons utilisé le dispositif décrit de la troisième jusqu'à la sixième, en TQ comme en transition, dans des classes de sciences de base ou d'options ou dans des classes préparatoires à l'école polytechnique. On peut aller jusqu'à faire de l'analyse chimique (en l'utilisant comme spectrophotomètre) mais ce n'est pas ce qui est décrit ici.

---

## 1 Le spectromètre

---

Un spectromètre optique permet de décomposer la lumière qui lui est présentée (souvent, comme ici, devant une fente ou dans des modèles plus élaborés à une extrémité d'une fibre optique) sur une échelle d'énergie (ou sur une échelle équivalente : longueur d'onde, fréquence, ...). Comme la couleur est liée à la longueur d'onde de la lumière, une lumière composée d'un mélange de plusieurs couleurs va être décomposée en ses différentes couleurs selon des règles bien précises (que nous ne discuterons pas ici) .

Ceci peut être fait facilement avec un prisme mais l'exploitation du résultat (photo, film, mesure) est alors plus difficile.

Les spectromètres optiques modernes utilisent plutôt des réseaux. C'est le cas pour notre spectromètre.

Un spectroscopie va lui aussi décomposer la lumière mais il n'y aura pas d'échelle de longueur d'onde.

---

1. Presque vraies, nous en discuterons plus loin.

## A Le principe

Un réseau de diffraction est un dispositif optique constitué soit de fentes parallèles très fines (réseau en transmission) ou de rayures réfléchissantes également très fines (réseau en réflexion).

Les phénomènes de diffraction aboutissent à des interférences constructives (de la lumière) ou destructives (de l'obscurité).

Si on projette la lumière issue du réseau sur un écran, des taches lumineuses et obscures s'alternent régulièrement.

La distance entre ces taches va varier selon la couleur de la lumière.

Si la lumière est constituée d'un mélange de couleurs différentes, les taches de couleurs différentes ne vont pas se superposer.

Juste dans l'alignement de la fente, du réseau et de l'écran, on aura une tache de la couleur de la lumière de départ (l'ordre 0), puis, à égale distance autour de la tache de l'ordre zéro, deux larges taches multicolores (appelées respectivement l'ordre 1 et l'ordre -1). D'autres taches multicolores correspondent aux ordres deux et moins deux, trois et moins trois, etc. C'est un des ces "ordres 1" que nous exploiterons car ils sont les plus intenses.



FIGURE 1 – Une lampe blanche derrière un réseau : les ordres zéro, un et moins un.  
Source : [wikipedia](#)

Remarquons qu'avec un réseau la déviation des couleurs se fera dans un ordre inverse de celle obtenue par un prisme.

### a) DVD comme réseau

Un DVD présente une structure de rainures très fines. Comme introduction, nous faisons souvent observer la réflexion de la lumière issue de lampes ou du soleil sur un DVD. Un spectre apparaît clairement.



FIGURE 2 – Un DVD comme réseau par réflexion. Source : [wikipedia](https://fr.wikipedia.org/wiki/DVD)

Le spectre obtenu va être légèrement courbé par rapport à celui obtenu à partir d'un réseau droit.

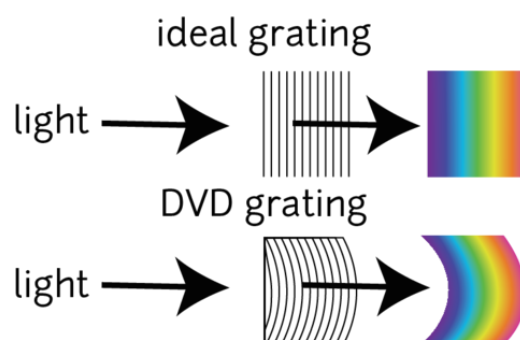


FIGURE 3 – Le spectre obtenu avec le DVD est courbé.

Source : <https://i.publiclab.org/system/images/photos/000/008/903/medium/ideal-vs-dvd-grating-ed.png>

Si on casse un morceau de DVD avec une pince coupante (pour électricien par exemple) et que l'on arrache le mince film métallique collé à la surface du DVD, on obtient un réseau par transmission.

ATTENTION : Ne touchez pas la surface du DVD avec vos doigts. Les acides gras à la surface de vos doigts vont rendre le réseau inutilisable.

### b) Webcam

Si on vient positionner une webcam dans l'axe du faisceau lumineux du premier ordre, le spectre peut immédiatement être enregistré, filmé ou projeté en direct sur un écran.


Dans un premier temps, nous utilisons le logiciel [VLC](#) pour ce faire. Il est gratuit et multiplateforme (PCs, MACs, Linux, ...).

## B Adresses


Le matériel décrit ici a été créé par des militants écologistes américains pour mesurer la pollution de la marée noire de 2010 dans le golfe du Mexique. Cette marée noire était issue de la station de forage sous marine "Deep horizon".

Différents modèles sont disponibles. Nous utilisons celui qui est basé sur une webcam. Des modèles pour smartphones existent.



Desktop  
Spectrometry Kit v3   
The standard -- plugs into your laptop  
[Build one](#) [Buy one](#)



Smartphone  
Spectrometer   
Rigid plastic version which attaches to  
your smartphone  
[Build one](#)




Foldable Mini-  
Spectrometer   
Cheap, easy, starter version for  
smartphones and webcams  
[Build one](#) [Buy one](#)

FIGURE 4 – Différents modèles de spectromètres.

Le matériel est très bon marché et le plan sous la licence "open-hardware" du CERN. Comme pour les documents de wikipedia, vous pouvez copier, modifier et diffuser librement les plans de montage.

### a) Kit à commander

On peut commander le kit (45\$ plus la livraison) :

<http://store.publiclab.org/collections/spectrometry/products/desktop-spectrometry-kit-3-0>.

Vous recevrez alors un boîte comme celle de la figure ci-dessous :



FIGURE 5 – Le kit à la livraison

La construction et l'assemblage sont décrits sur le site <https://publiclab.org/wiki/desktop-spectrometry-kit-3-0>.

### b) DIY

Vous pouvez télécharger les plans et réaliser vous même votre spectromètre.

Le prix se réduit alors à celui de l'acquisition d'une webcam bon marché et de carton noir.

### c) Autres kits

D'autres kits existent qui sont aussi très intéressants.

## 2 Le logiciel

Pour exploiter les spectres, le même groupe a réalisé plusieurs logiciels.

Malheureusement, le développement des versions installables a été arrêté. Il faut utiliser la version en ligne. Ceci impose d'avoir une connexion internet. (Une connexion avec un smartphone faisant point d'accès fonctionne très bien.)



Il est en principe possible de l'utiliser hors-ligne après une première utilisation en ligne mais :

1. Ça ne marche pas toujours !
2. On ne sait alors pas calibrer son spectre.

## A En ligne

### a) Link

Associé au site "publiclab.org", le site <https://spectralworkbench.org/> fournit le logiciel de visualisation et d'analyse des spectres.

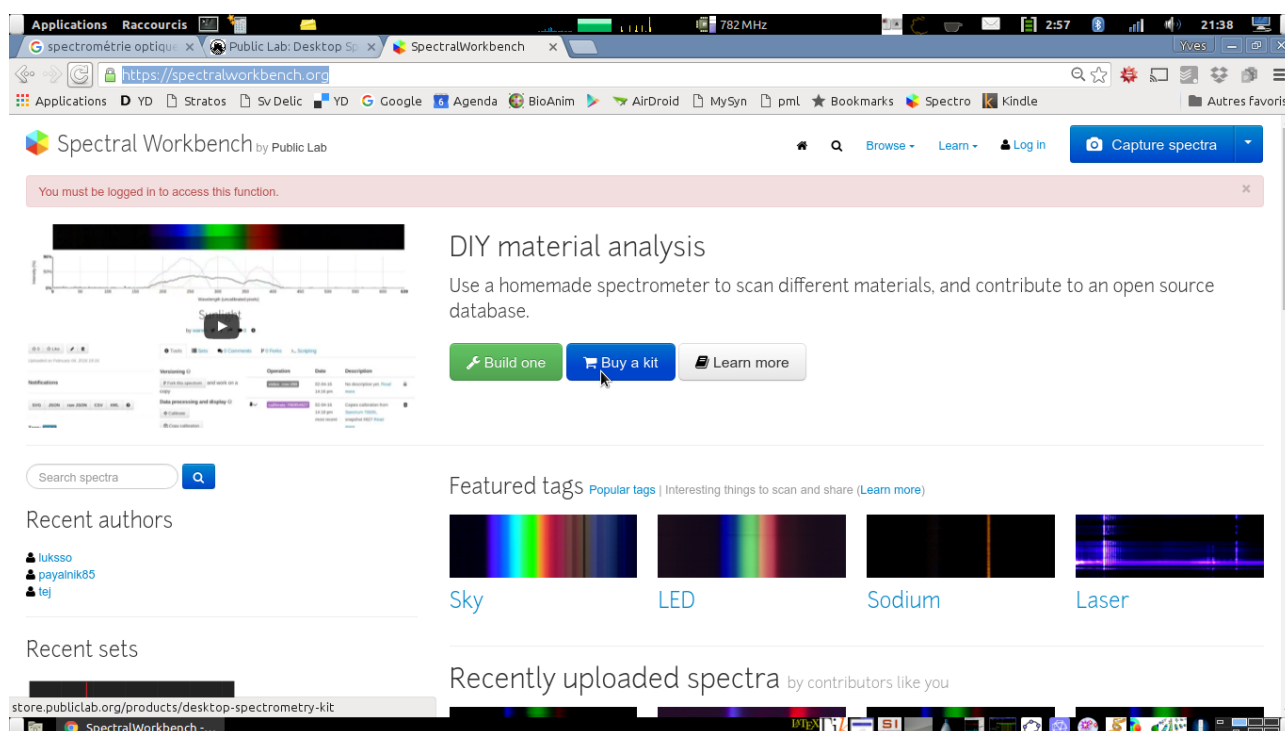


FIGURE 6 – Le site spectralworkbench.

## B Chrome, Opera ou Firefox

Une remarque : pour visiter le site, il faut utiliser Chrome, Firefox ou Opera. PAS Internet Explorer qui n'est pas compatible.

Nous décrivons ici l'utilisation avec Chrome. les emplacements des menus peuvent différer légèrement avec les autres arpenteurs web.

### a) OpenId

Il n'est pas nécessaire de s'authentifier pour une utilisation basique mais c'est obligatoire pour calibrer votre spectromètre.

Nous vous encourageons à le faire : la suite sera plus simple.

Il faut donc se créer un nom d'utilisateur et un mot de passe. Enregistrez ce mot de passe pour ne plus avoir à le réintroduire à chaque utilisation.

Si vous voulez faire un laboratoire avec vos élèves, il faut créer un couple "nom d'utilisateur/mot de passe pour chaque PC".

Attribuez toujours la même webcam au même PC. Ainsi la calibration de cette webcam ne devra être effectuée qu'une fois (par vous).

## C Premier contact

En haut à droite de la page d'accueil, il faut cliquer sur "Capture spectra".

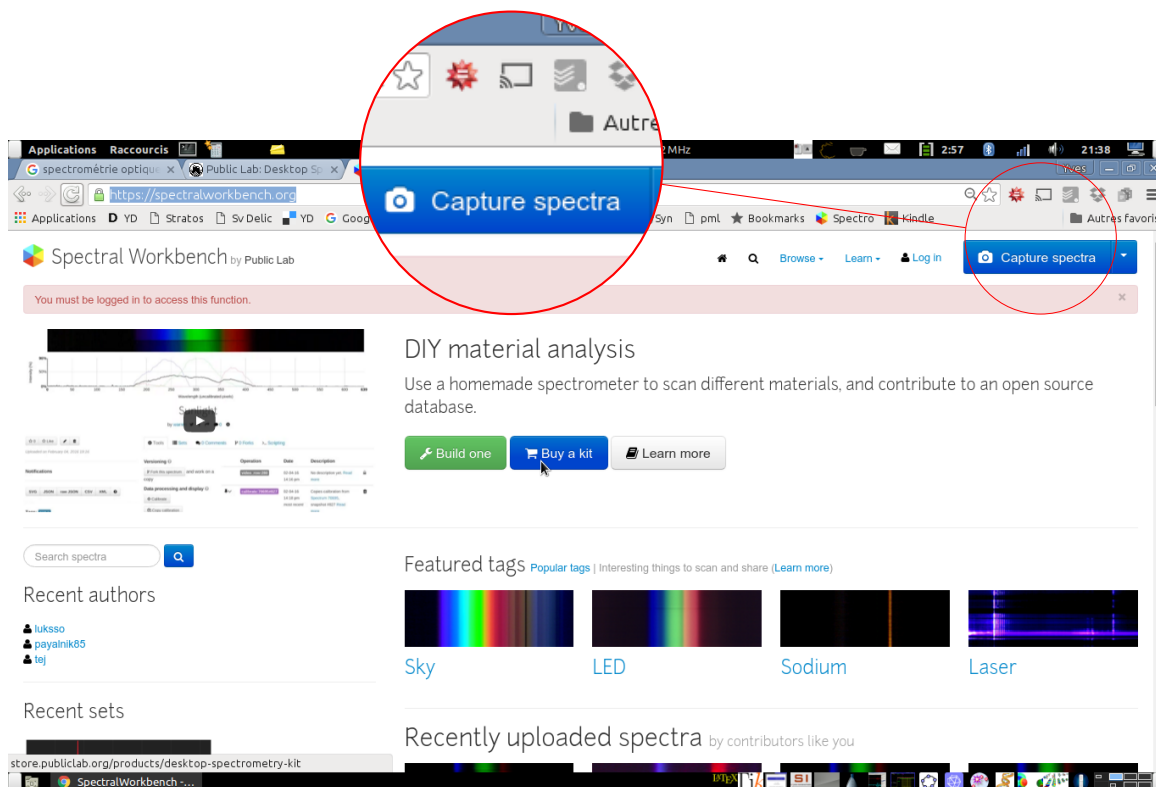


FIGURE 7 – "Capture spectra".

### a) Autorisation d'utilisation de la caméra

Il faut autoriser le site à accéder à votre webcam. Il faut cliquer sur l'icône de caméra dans la barre d'adresse (ceci peut changer avec les versions du logiciel).



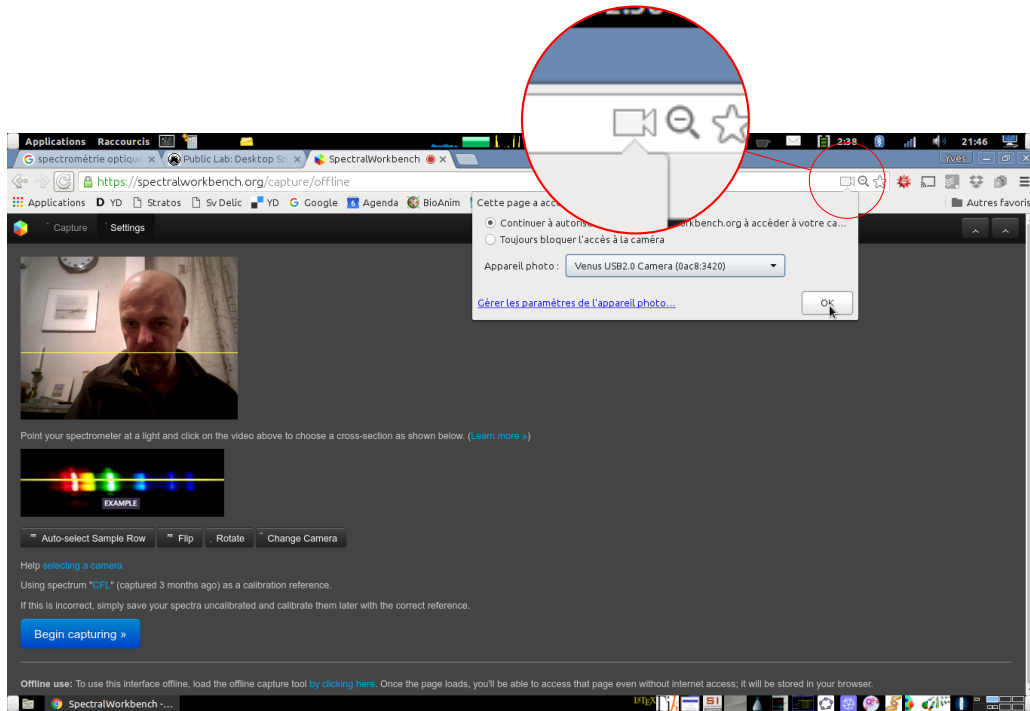


FIGURE 8 – Autorisation d'accès à la webcam.

Si vous avez plusieurs webcams, il faut sélectionner la bonne.

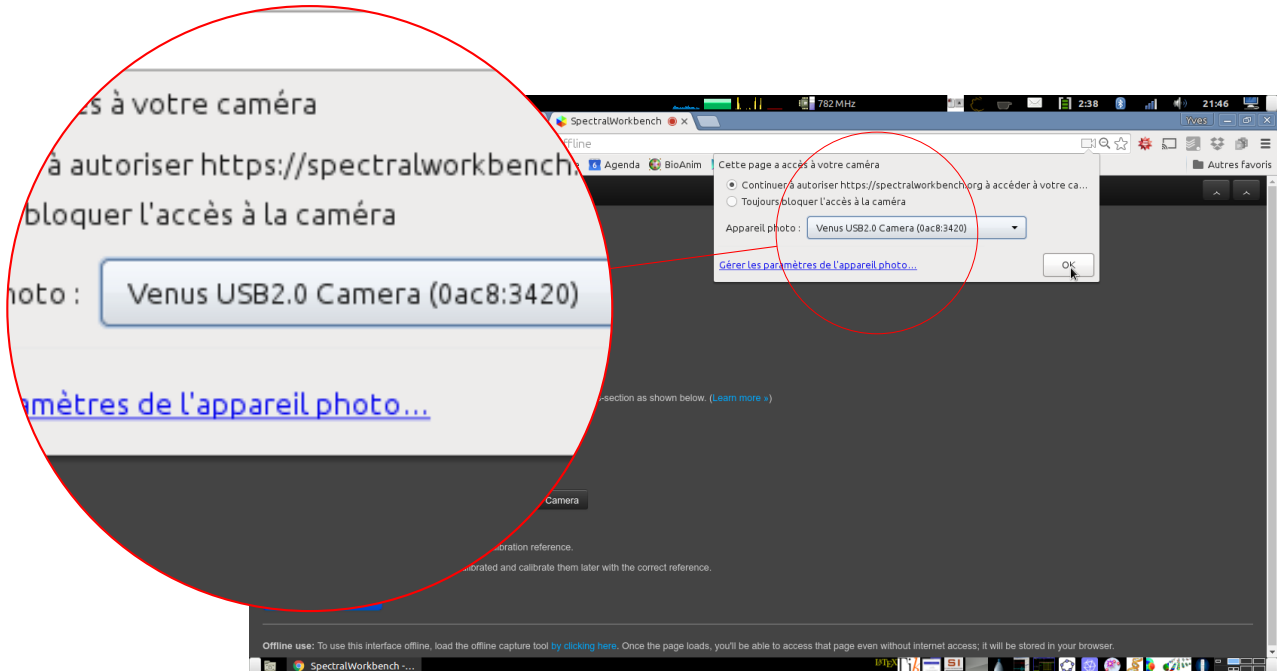


FIGURE 9 – Choix de la "bonne" webcam.

**b) Choix de la bonne ligne**

Il faut positionner sur l'image la ligne où le spectre va être mesuré. Cliquer avec la souris sur l'image de gauche.

Cette image est celle "vue" par la webcam.

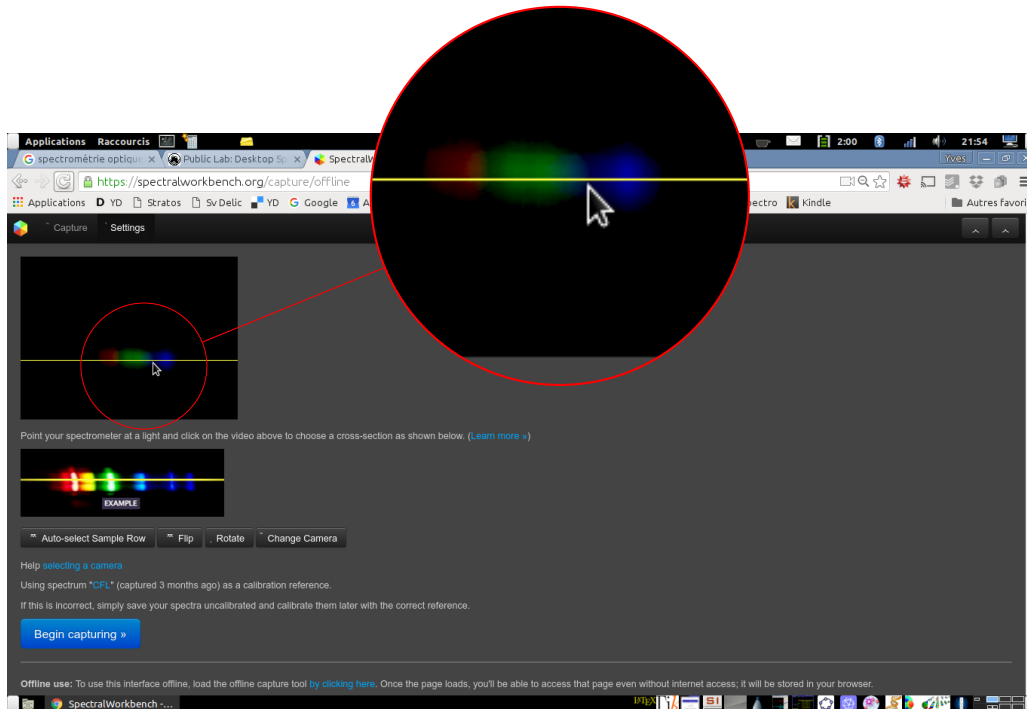


FIGURE 10 – Ligne du spectre.

Cliquez pour que la ligne horizontale jaune traverse le spectre et que l'intensité soit optimale (saturation possible).

Cette ligne jaune va correspondre à la ligne de pixels qui va servir à construire le spectre.

**c) Acquisition**

On peut cliquer sur "Begin capturing".

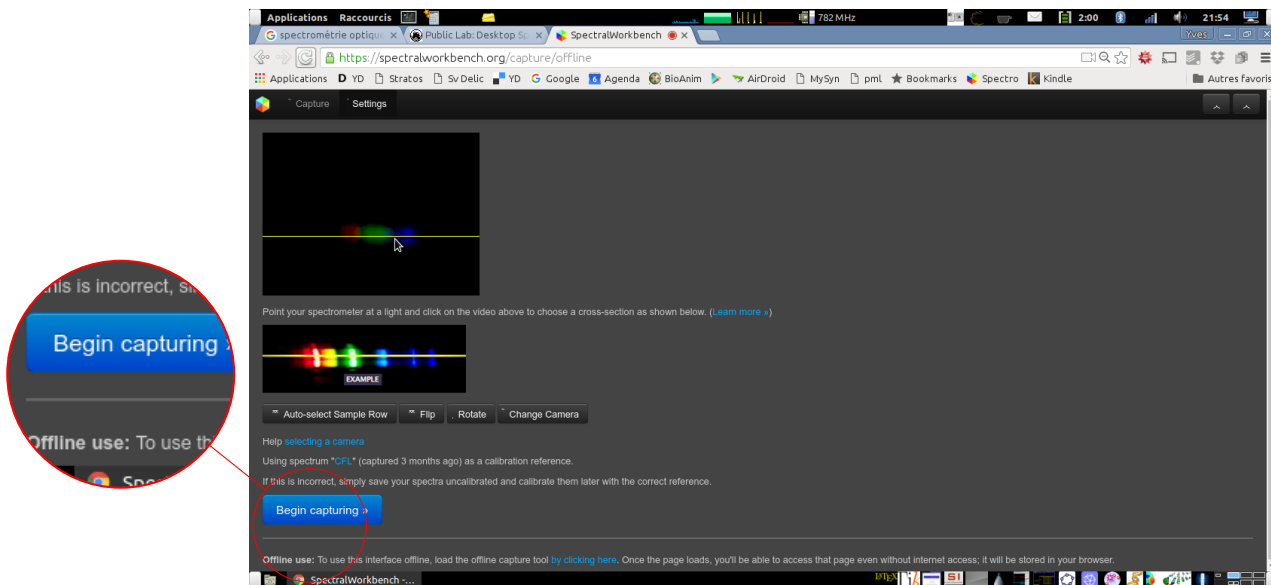


FIGURE 11 – Commencer la capture.

**d) Spectre RGB ou monochromatique**

Si l'image affichée sera toujours en couleurs, le graphe des intensités en fonction de la longueur d'onde peut-être affiché soit en RGB (ceci correspond aux filtres placés devant les capteurs) ou en monochromatique.

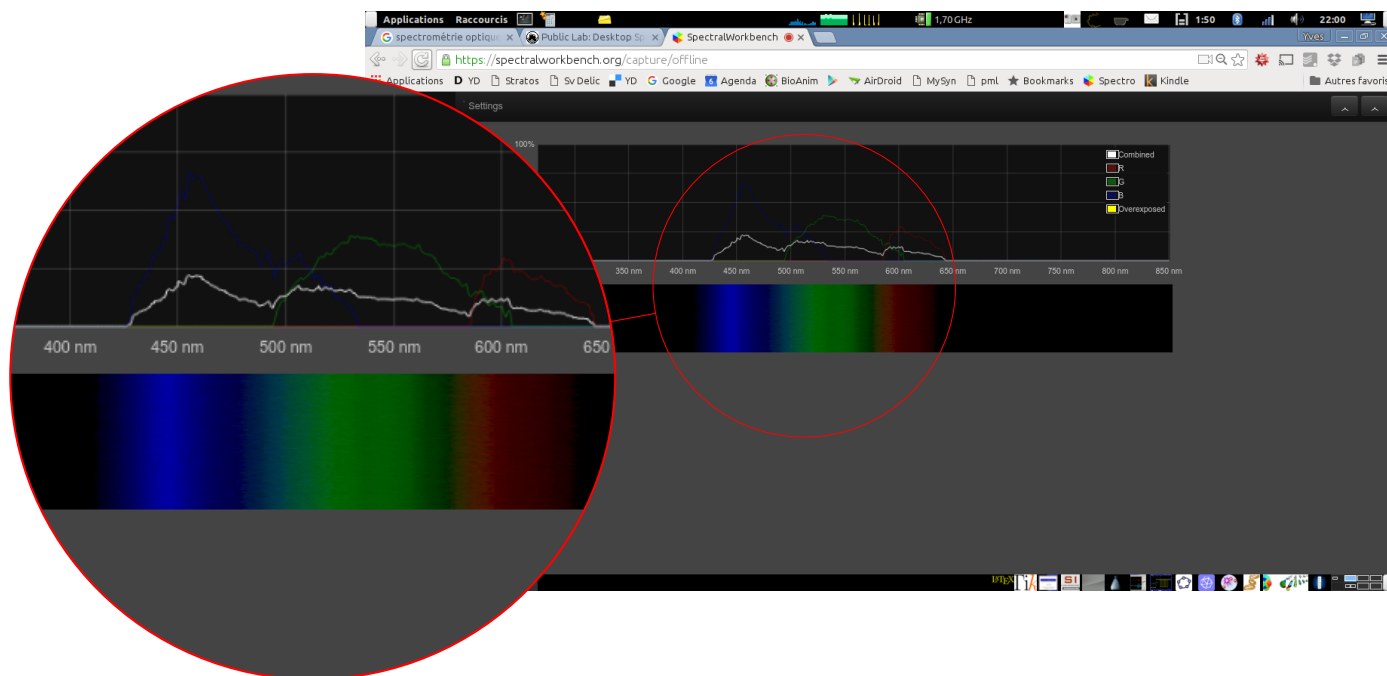


FIGURE 12 – Graphique du spectre en RGB.

Les capteurs des webcams (mais aussi des caméras et des appareils photo "digitaux") sont monochromatiques.

Un filtre coloré est placé devant chaque pixel du capteur de la webcam. Un motif de filtres se répète le capteur : devant un carré de quatre pixels, il y a un carré de quatre filtres, une diagonale avec deux verts et l'autre diagonale avec un bleu et un rouge.

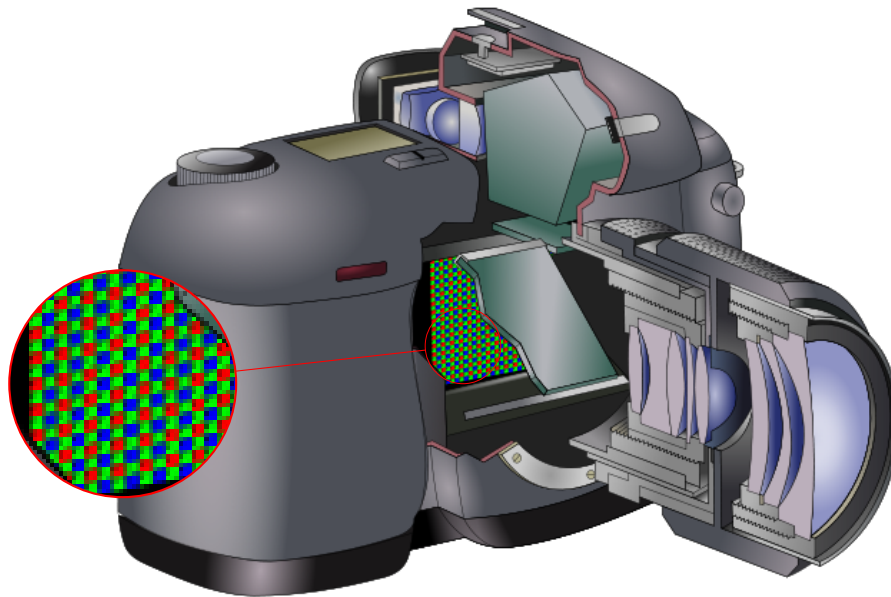


FIGURE 13 – Filtres colorés dans un réflex numérique.

Source : [wikipedia](#) modifié par l'auteur.

Comme pour l'œil humain, il n'y a donc que trois couleurs perçues et l'ensemble des couleurs est reconstruit par addition de ces trois couleurs.

Les couleurs affichées sont donc le résultat de l'addition de ces trois couleurs : le rouge, le vert et le bleu.

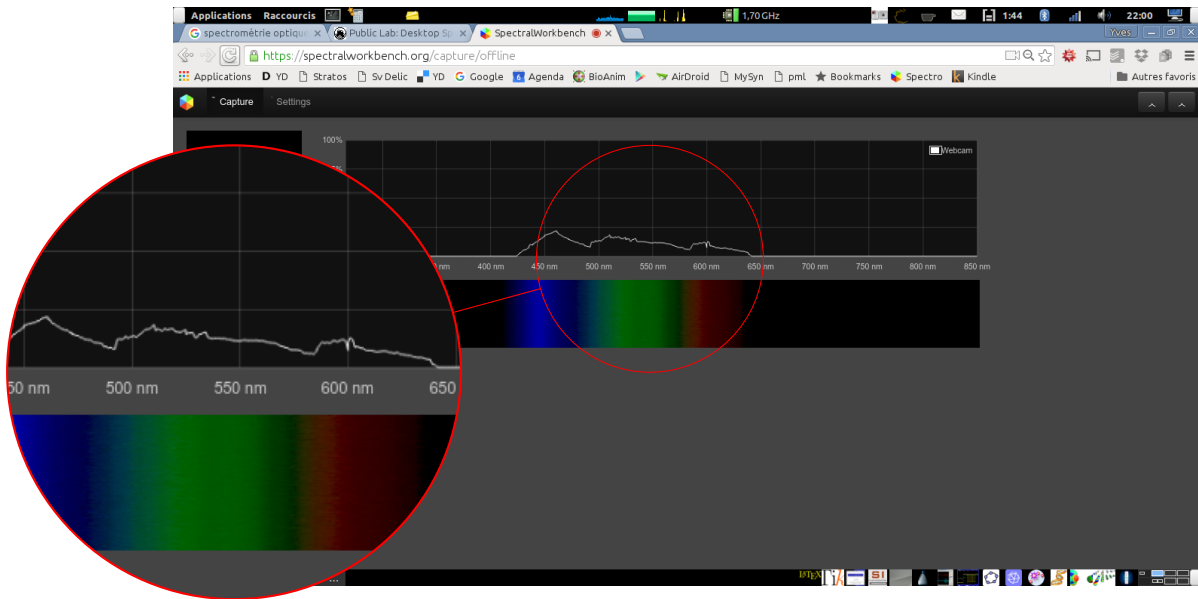


FIGURE 14 – Graphique du spectre en monochrome.

**e) Éventuellement retourner l'image**

L'image peut être dans le mauvais sens. Il faut la retourner.

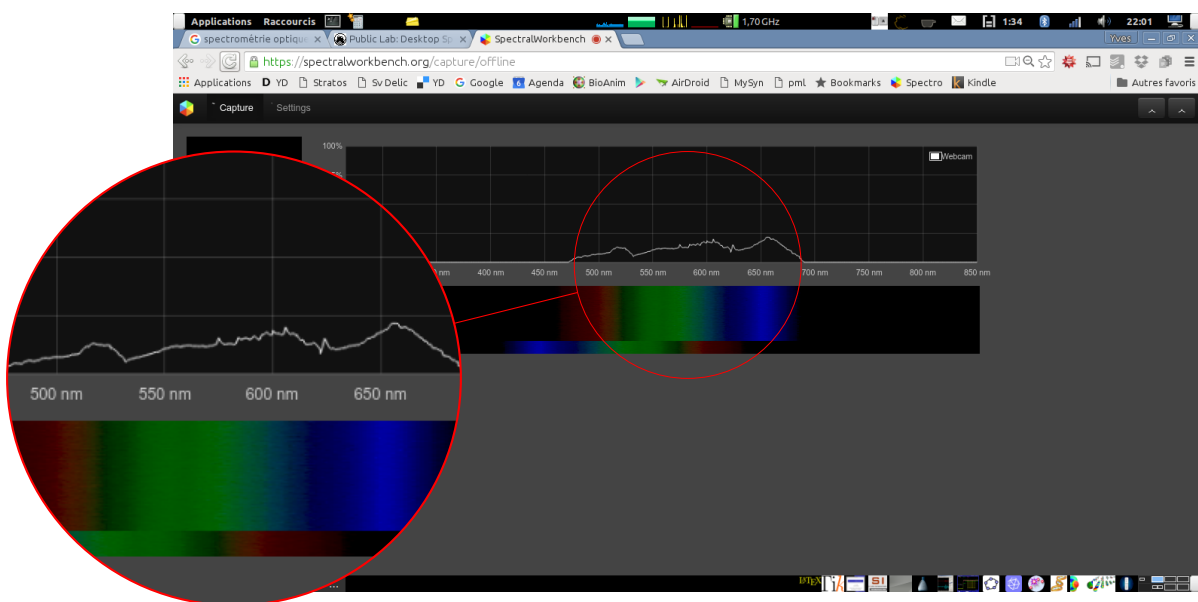


FIGURE 15 – Avant retournement du spectre : Oops, le bleu est à 650 nm!

Ceci peut se faire à ce niveau. On pourra aussi cliquer sur "flip" soit dans un écran suivant.

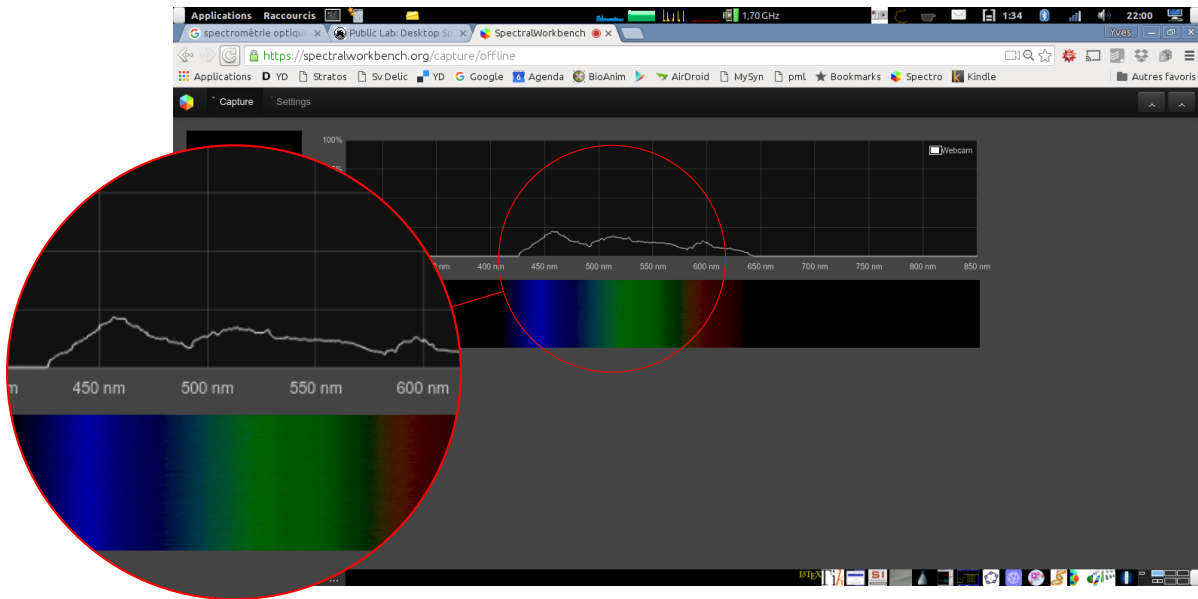


FIGURE 16 – Retournement "gauche-droite" du spectre.

#### f) Enregistrer les spectres

Si on s'est enregistré sur le site, on peut enregistrer les images et les spectres. Si on enregistre une image on peut calibrer le spectre voir le point suivant.

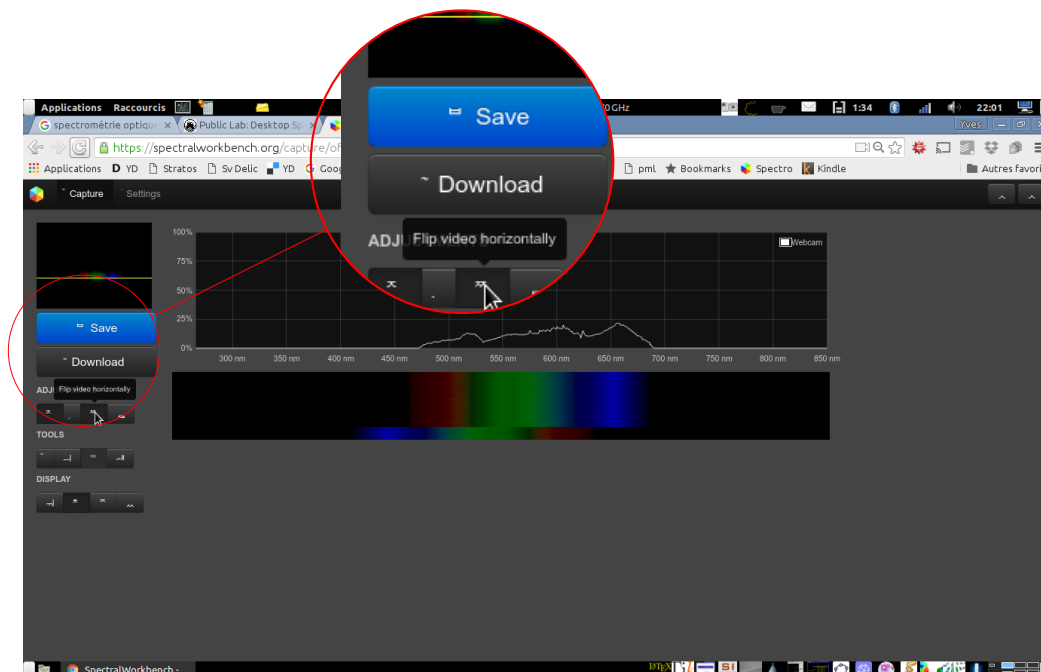


FIGURE 17 – Enregistrement d'une image et du spectre.

#### g) Calibration avec $Hg$

Le mercure a deux raies d'émission à

- 463 nm
- 546 nm

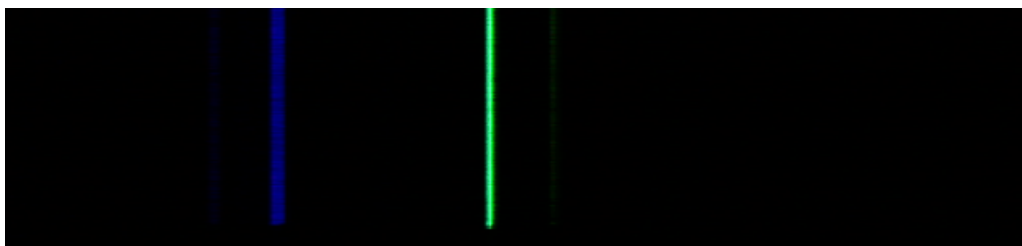


FIGURE 18 – Les deux raies du mercure.

Ces deux raies du mercure permettent de calibrer très facilement le spectromètre. Les lampes économiques contiennent un peu de mercure.

Et donc une lampe économique convient parfaitement pour calibrer notre spectromètre.

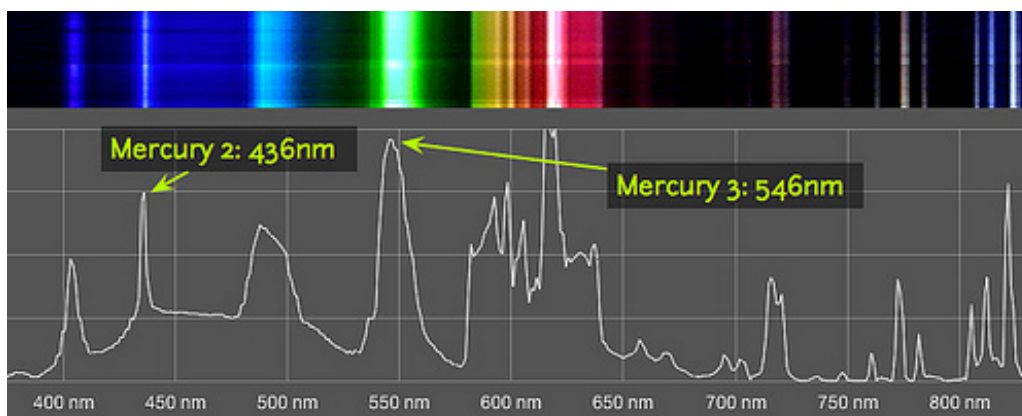


FIGURE 19 – Les deux raies du *Hg*.

La calibration est discutée sur <https://publiclab.org/wiki/spectral-workbench-calibration>.

### 3 Exemples de spectres

Nous allons décrire et montrer ici quelques spectres faciles à obtenir.

Nous montrons ces spectres surtout pour que vous soyez attentifs aux sources de lumières colorées que vous allez utiliser.

Les spectres discontinus n'étant explicables que par la mécanique quantique, l'explication de leur existence sort du cadre d'un cours d'introduction à la lumière et aux couleurs.

De plus, si on ne s'est pas préparé, ces sources de spectres discontinus peuvent compromettre une expérience sur la décomposition des couleurs.



## A Différentes sources

### a) Soleil

Si, de jour, on braque le spectromètre vers une fenêtre on obtient un spectre de la lumière du Soleil.

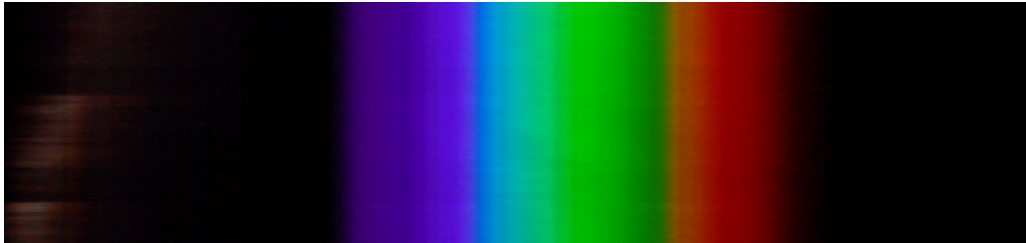


FIGURE 20 – Spectre de la lumière solaire.

Voir : <https://spectralworkbench.org/spectrums/46222>

### b) Lampes "classiques" (en voie de disparition)

Le spectre d'une lampe à incandescence est proche de celui d'un corps noir. Si on fait varier la puissance de la lampe, la loi de Wiens peut être illustrée.

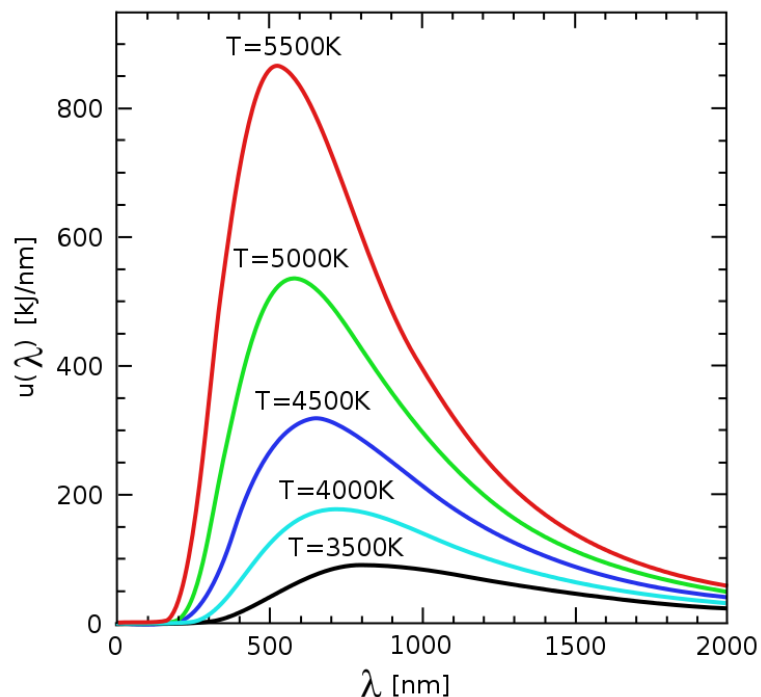


FIGURE 21 – La loi de Wiens.

### c) "Néons"

Le spectre de lampes dites "au néon" montre que la lumière de ces lampes est un mélange de couleurs mais n'est pas le résultat d'un spectre continu.

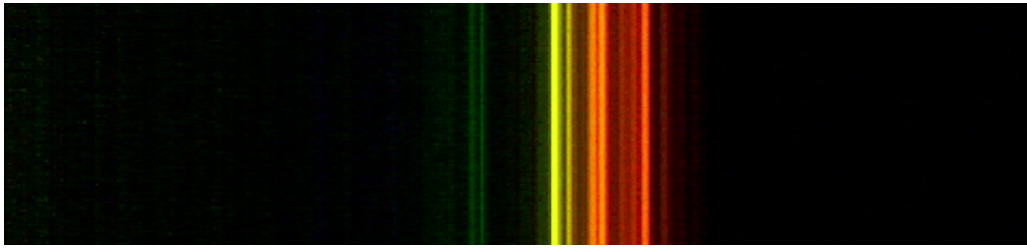


FIGURE 22 – Spectre d'une lampe au "néon".

Voir : <https://spectralworkbench.org/spectrums/72233>

#### d) Leds

Le spectre de lampes LED montre que la lumière de ces lampes est souvent presque monochromatique.

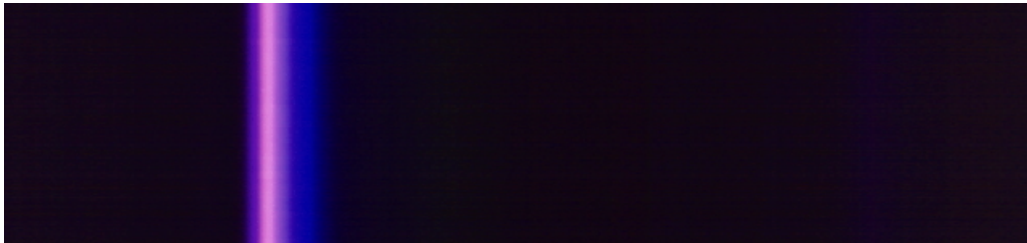


FIGURE 23 – Spectre d'une lampe LED.

Voir : <https://spectralworkbench.org/spectrums/73265>

Si la LED est blanche alors le spectre montre le mélange de couleurs mais il est clair que le blanc n'est pas le résultat d'un spectre continu.

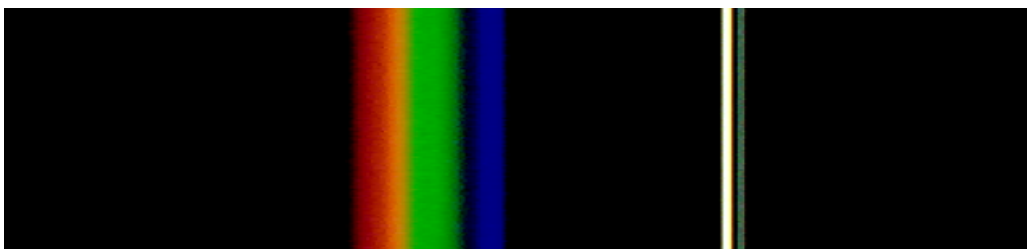


FIGURE 24 – Spectre d'une lampe LED multicolore.

Voir : <https://spectralworkbench.org/spectrums/73418>

#### e) Lampes économiques

Le spectre de lampes économiques contient les deux raies du mercure.

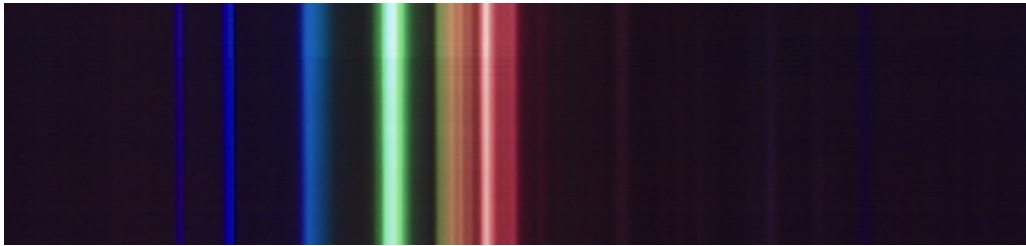


FIGURE 25 – Spectre d'une lampe économique.

Voir : <https://spectralworkbench.org/spectrums/72233>

## B Effets des filtres

On peut "jouer" avec des filtres et montrer quelles couleurs sont arrêtées.

### a) Un seul filtre

L'effet d'un filtre coloré peut être étudié. Si un filtre rouge, vert ou bleu est utilisé, l'intensité d'un seul capteur va chuter presque jusqu'à l'extinction.

Mais si c'est un filtre "cyan" qui est utilisé, deux capteurs vont voir leur intensité diminuer !

### b) Plusieurs filtres

Puis on peut combiner des filtres.

## C Miroirs

Les miroirs ont pour effet de diminuer l'intensité de la lumière.

# 4 Quelques points pour aller plus loin

## A Émissions et absorptions

### a) Émissions

Les spectres montrés jusqu'ici étaient des spectres d'émissions.

Le spectre du sodium est un bel exemple qui peut illustrer un cours sur la structure électronique des atomes.

Voir : <https://spectralworkbench.org/spectrums/66548>

### b) Absorptions

Si vous donnez cours de chimie ou en collaboration avec un collègue, des spectres d'absorption peuvent être réalisés.

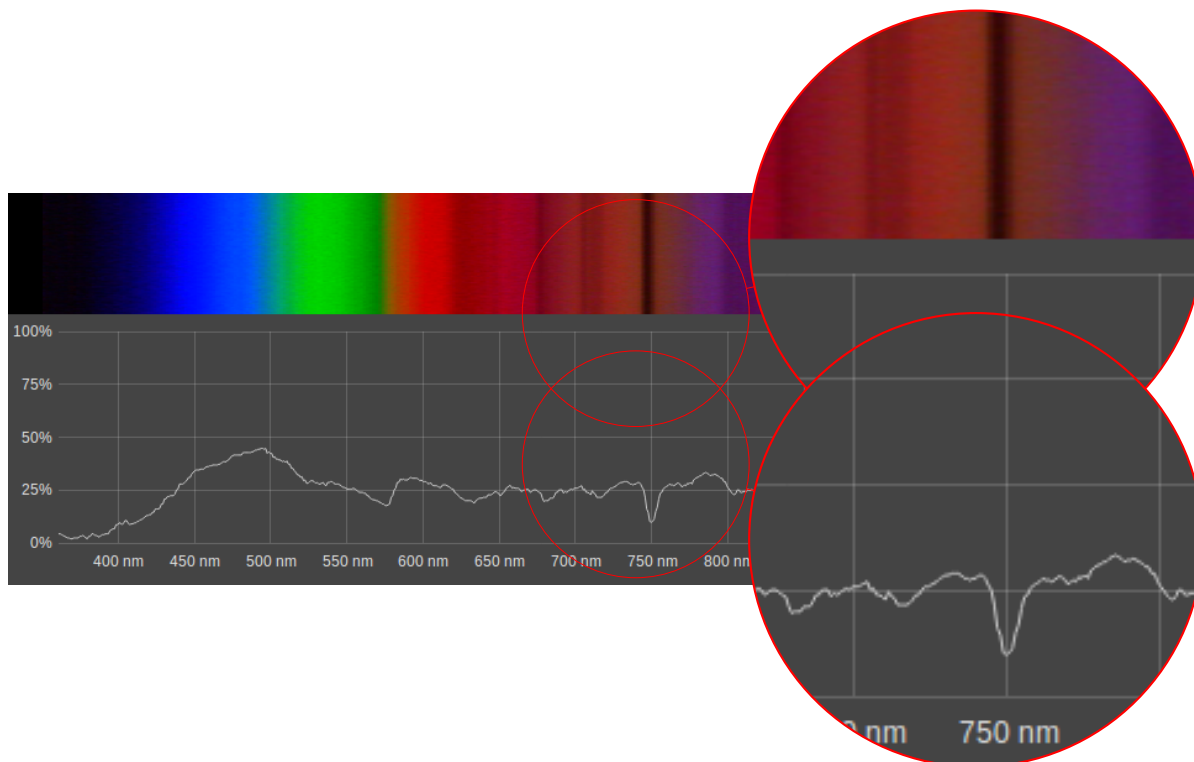


FIGURE 26 – Raie d’absorption de la vapeur d’eau dans la lumière solaire.

### c) Spectrophotomètre

Des mesures d’absorption peuvent permettre d’illustrer la loi de Beer-Lambert.

## B Infrarouges et ultraviolets

Les capteurs de webcam sont sensibles aux infrarouges et aux ultraviolets proches. Parfois des filtres doivent être enlevés dans la webcam.

On peut alors réaliser de la spectrométrie infrarouge !

L’apparition des ”couleurs” aux extrémités du spectre est source de discussions intéressantes avec les élèves.

## Conclusion

Le matériel décrit ici est bon marché et relativement facile à utiliser.

Ne vous ”embarquez” pas néanmoins sans avoir fait quelques essais.

La manipulation n’est pas immédiate. Et il faut se familiariser avec le logiciel.

Mais, si c’est le cas, le fait de rendre concrets des concepts par ailleurs fort abstraits est un grand plaisir pour le pédagogue. De plus, les expériences possibles sont très démonstratives pour les élèves.

## Table des matières

<b>1 Le spectromètre</b>	<b>2</b>
A Le principe	3
a) DVD comme réseau	3
b) Webcam	4
B Adresses	5
a) Kit à commander	5
b) DIY	6
c) Autres kits	6
<b>2 Le logiciel</b>	<b>6</b>
A En ligne	7
a) Link	7
B Chrome, Opera ou Firefox	7
a) OpenId	7
C Premier contact	8
a) Autorisation d'utilisation de la caméra	8
b) Choix de la bonne ligne	10
c) Acquisition	10
d) Spectre RGB ou monochromatique	11
e) Éventuellement retourner l'image	13
f) Enregistrer les spectres	14
g) Calibration avec <i>Hg</i>	14
<b>3 Exemples de spectres</b>	<b>15</b>
A Différentes sources	16
a) Soleil	16
b) Lampes "classiques" (en voie de disparition)	16
c) "Néons"	16
d) Leds	17
e) Lampes économiques	17
B Effets des filtres	18
a) Un seul filtre	18
b) Plusieurs filtres	18
C Miroirs	18
<b>4 Quelques points pour aller plus loin</b>	<b>18</b>
A Émissions et absorptions	18
a) Émissions	18
b) Absorptions	18
c) Spectrophotomètre	19
B Infrarouges et ultraviolets	19

La version la plus récente du présent document peut être trouvée sur le site de son auteur à l'adresse suivante :

<http://www.yvesdelhayebel.be/?Un-spectrometre-bon-marche-grace-a>