

TRAVAIL PRATIQUE

Caractérisation de lampes et filtres par spectrométrie

1 But de l'expérience

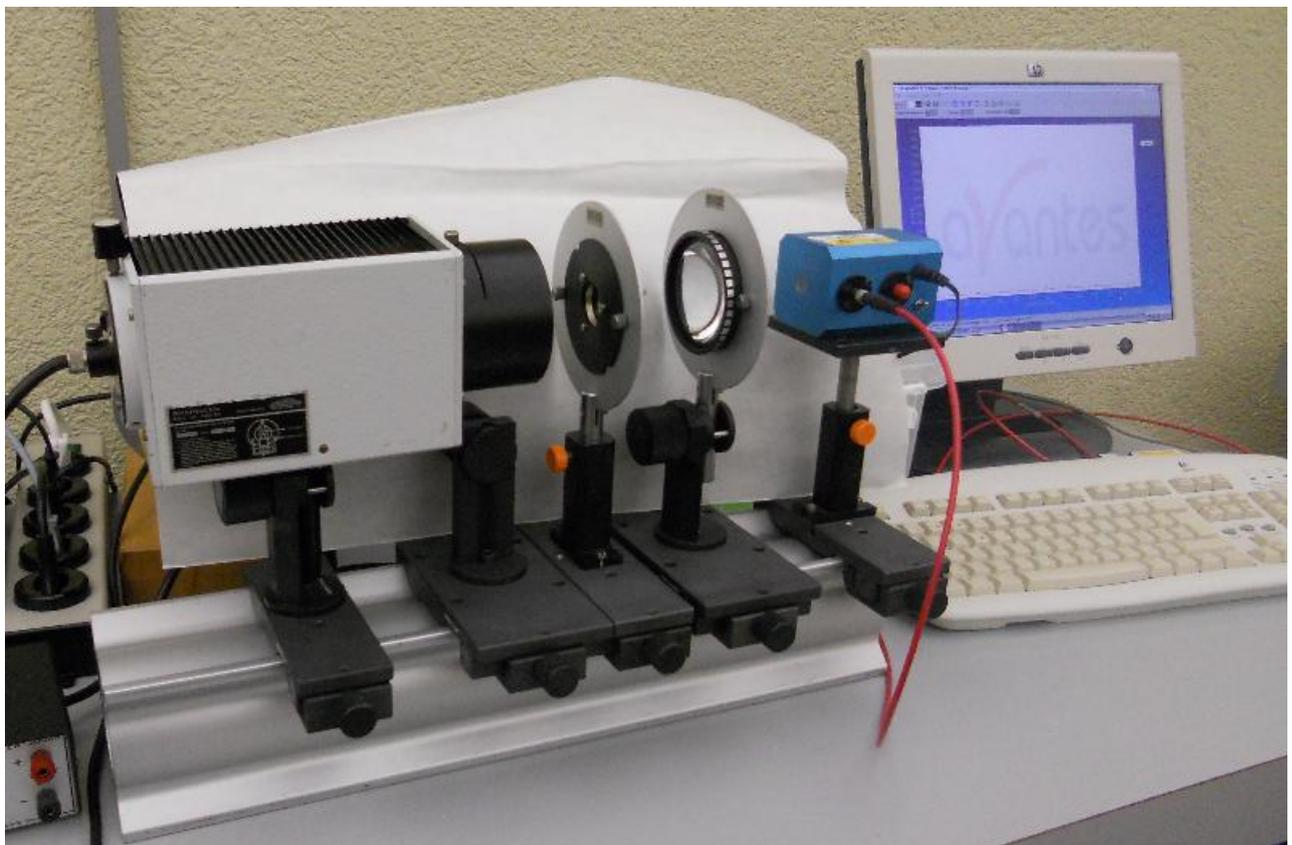
Ce TP complète une expérience préliminaire réalisée lors du cours de métrologie (MTR), qui a déjà familiarisé les étudiants avec le spectromètre utilisé ici.

L'objectif de ce travail pratique est de comparer les caractéristiques de la lumière produite par divers types de lampes d'illumination domestique:

- Ampoules à incandescence
- Ampoule «économique» et lampes à néon
- Lampes à LED de divers type

On devra en particulier trouver la **température de couleur** de ces lampes, qui est actuellement un des principaux critères pour évaluer les qualités de remplacement des ampoules économiques et LED par rapport à celles à incandescence.

Ensuite on va évaluer la **bande passante** d'un filtre interférométrique et calculer la longueur et le temps de cohérence de la lumière produite.



2 Matériel et instrumentation

Un petit banc de mesure sur lequel on pourra monter quelques types de sources, ce banc est composée :

- Un spectromètre ADVANTES AVSUSB2000 (no. de série USB2E1861) avec sa fibre optique d'entrée.
- Des optiques pour créer un faisceau dans lequel on pourra intercaler des éléments à caractériser, ainsi que pour focaliser la lumière sur la fibre d'entrée
- Un PC sur lequel sont installés le logiciel du spectromètre, ainsi qu'Excel, Matlab et le toolbox OptProp.
- Plusieurs sources et filtres
- La sphère intégrante ISP-REF



3 Procédure (rappel)

3.1 Préparation

Un microspectromètre Avantes permet d'effectuer à partir d'un PC des mesures spectrographiques. Le spectromètre reçoit la source lumineuse à mesurer à travers d'une fibre optique. Une manière simple de collecter la lumière à analyser est ainsi d'approcher l'extrémité de la fibre optique à la source. Cette méthode est en particulier utile quand la source est plutôt faible en intensité.

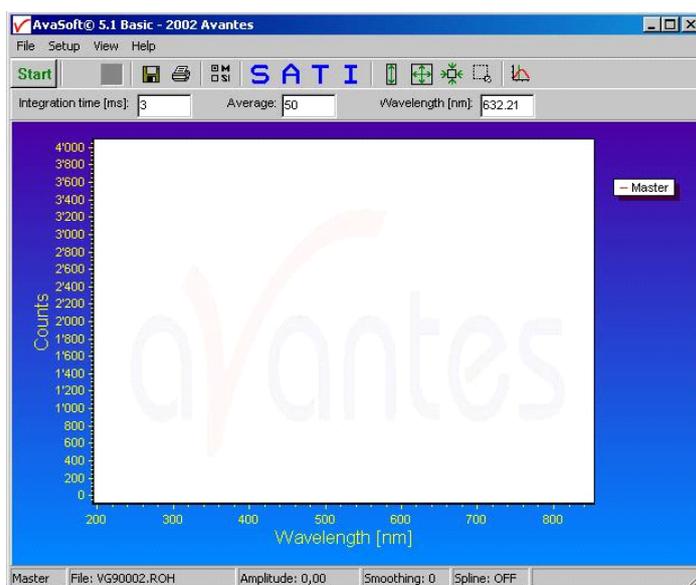
Pour des sources d'intensité moyenne/grande il convient d'utiliser comme capteur de lumière la petite **sphère intégrante** connectable à la fibre optique. La sphère intégrante moyenne et donc stabilise l'intensité entrant dans la fibre. Le module intégrant inclut aussi une source de référence interne.

Le spectromètre opère par le programme **AvaSoft**.

Ce programme est en anglais et est bien documenté dans son menu «Help», dont quelques pages principales se trouvent aussi en annexe à ce document.

L'essentiel pour effectuer une mesure se trouve à la page

Quick Start: Measuring and saving a spectrum.



3.2 Mesure en mode *Scope*

Avant de prendre des mesures dans Avasoft, il faut créer une nouvelle expérience dans un répertoire dédié. De cette manière on retrouvera plus facilement les fichiers générés.

> *File* > *Start new experiment*

Créer un répertoire dans D:/matlab_work/spectro/datas/ pour enregistrer vos fichiers.

Quatre modes de mesure sont à disposition :

- **S** : *Scope* : mesure brute (**non étalonnée** – voir ici-bas) du spectre
- **A** : *Absorbance* : spectre « absorbé » par un filtre
- **T** : *Transmission* : spectre transmis par un filtre
- **I** : *Irradiance* : spectre d'émission d'une source



Au lancement du programme seul le mode *Scope* est disponible. Notons préalablement que ce spectromètre à une fenêtre et une sensibilité essentiellement centrée sur la bande de longueurs d'ondes visibles, et assez proche (mais pas identique) à celle de l'œil humain.

En mode *Scope* (mesure brute) la mesure est immédiate: ajustez le temps d'intégration pour avoir un spectre avec environ 2000 à 3000 **counts** et éviter une saturation de l'instrument.

Les autres modes demandent un **étalonnage** préalable.

3.3 Etalonnage

L'**étalonnage** consiste en mesurer le **dark** et avoir une **référence** pour avoir une mesure étalonnée.

- Le **dark** (niveau de noir) est une mesure effectuée lorsque la source est absente, mais avec le même temps d'intégration qui sera utilisé pour les mesures. Le dark mesuré est en fait un **zéro** au sens métrologique du terme et sera soustrait à toutes les mesures futures. Pour mesurer ce dark, il suffit de cliquer sur le bouton en forme de carré noir en haut à gauche ou *File-> Save -> Dark*.
- La **référence** est une mesure qui est utilisée quand on veut caractériser des éléments optiques (en transmission ou en réflexion) indépendamment de la source utilisée. Elle se fait donc quand la source est enclenchée, mais qu'aucun élément à caractériser n'est présent. 1. Utiliser la lampe interne de la sphère intégrante ISP-REF pour prendre une référence d'un corps noir connu (**température 3100 K**). Menu *File-> Save -> Reference*.

Lorsqu'une mesure sera effectuée après calibration du dark et de la référence, le logiciel va effectuer automatiquement l'opération suivante:

$$I(\lambda) = \frac{I_{\text{signal}}(\lambda) - I_{\text{dark}}(\lambda)}{I_{\text{reference}}(\lambda) - I_{\text{dark}}(\lambda)}$$

Il faut savoir que la densité spectrale d'énergie de la source peut être très faible à certaines longueurs d'onde. Donc le dénominateur de l'équation ci-dessus devient très petit et le bruit qui entache cette mesure devient donc très important en quantité relative. C'est ce qui explique qu'un spectre calibré à souvent des zones bruitées.

Après cet **étalonnage**, nous sommes prêts pour prendre des mesures d'éléments optiques.

Chaque enregistrement dans Avasoft est fait dans un format propre. Il faut avoir préalablement sauvé la mesure dans un fichier .roh (pour le mode S – voir le tableau ici-bas pour les autres modes) :

menu *File* -> *Save* -> *Experiment*.

Ensuite on peut convertir les fichiers en ASCII, afin de les traiter ultérieurement avec Matlab ou Excel:

menu *File* -> *Convert Graph* -> *to ASCII*,

Il faut convertir chaque fichier séparément. Les enregistrements de données en mode transmission sont disponible depuis ce mode et idem pour les modes scope absorption et irradiance.

Mode de mesure	Extensions originales	Extensions converties en ASCII
<i>Scope</i>	.roh	.trt
<i>Absorbance</i>	.abs	.tat
<i>Transmission</i>	.trm	.ttt
<i>Irradiance</i>	.irr	.tit

Extensions des fichiers AvaSoft

Par exemple, le format d'un fichier .tit (en mode I) est le suivant :

```
M- nom de la source
Integration time: 7 ms
Average: 1 scans
Nr of pixels used for smoothing: 0

Wave      ;Dark      ;Ref      ;Sample      ;Relative Irradiance
[nm]      ;[counts] ;[counts] ;[counts] ;[% rel. irradiance]
189.06;-137.4;-136.4;-129.1;0
189.42;-7.82;-4.56;-5.68;6.250E-4
189.78;-1.36;-4.42;-2.13;0
190.14;4.18;0.442;-3.68;0
...
```

La dernière colonne est le spectre d'émission absolu recherché, exprimé en fonction des longueurs d'onde de la première colonne.

Pour traiter ces données dans Matlab il suffit d'éditer le fichier pour en supprimer les 7 premières lignes et ensuite utiliser la fonction Matlab `load`. Par exemple la fonction `load_tit` suivante charge dans un vecteur `val` un spectre lu dans un fichier .tit (sans les 7 premières lignes) et ensuite interpolé sur un vecteur `lambda` de longueurs d'onde prédéfini:

```
function [val] = load_tit (filename, lambda)
disp (filename)
xy = load (filename);
lam = xy(:,1);
y = xy(:,5);

for i = 1:length(lambda)
    val(i) = interp1 (lam,y,lambda(i)) / max(y)*100;
end

% figure
% plot (lam, y/max(y)*100, lambda, val)
```

4 Caractérisation des lampes domestiques

4.1 Ampoules standard à incandescence, économique et LED, lampe au néon

On caractérise souvent les lampes pour l'illumination ambiante par leur **température de couleur**, plus connue sous son nom anglais de *Correlated Color Temperature (CCT)* qui est déterminée à partir du spectre d'émission. Pour les lampes à incandescence il s'agira en fait de la température du filament.

Le **toolbox OptProp** pour Matlab est à télécharger à l'adresse <http://php.iai.heig-vd.ch/~lzo/pmo/optprop.zip>.

Il permet de calculer plusieurs caractéristiques de colorimétrie au départ d'un spectre mesuré. Utilisez la commande `pathtool` pour ajouter le répertoire de ce toolbox à ceux pris en compte par Matlab: option « **Add with sub-folders ...** »).

La CCT (température de couleur) est calculée par la fonction `roo2cct` de ce toolbox:

```
>> lambda = [400:10:700];  
>> spectre = load_tit ('xxx.tit', lambda);  
>> cct = roo2cct (spectre, '10', lambda)
```

4.1.1 Ampoules à incandescence

- Quelle température de filament trouvez vous pour les deux types d'ampoules (culots E27 et E14) ?
- Calculer ensuite le spectre de corps noir correspondant sur toute la zone du spectre où son amplitude est significative (qui peut aller jusqu'à 5000 nm). Ce spectre suit la loi de Plank (voir en annexe) et peut être calculé aussi par la fonction `blackbody` du toolbox OptProp. Par exemple :

```
>> lam = 300:10:5000;  
>> plot (lam , blackbody(2800,lam))
```
- Sachant cela et en utilisant la courbe de densité spectrale d'énergie du corps noir sur toute la zone du spectre où elle n'est pas négligeable, trouvez par intégration numérique la proportion de l'éclairement se trouvant dans le spectre visible (**entre 400 et 700 nm**) par rapport à l'énergie totale. Cette proportion est le **rendement de l'ampoule**, puisqu'il représente la proportion d'énergie visible par rapport à l'énergie totale de cette source «de lumière».

4.1.2 Ampoules à basse consommation et à LED, lampe au néon

Si les ampoules à incandescence ont toujours été faites pour la tension standard de 230 V, les nouveaux types introduits ces dernières années doivent inclure des composants électroniques permettant la conversion de la puissance sur 230 V AC vers l'alimentation particulière demandée par ces lampes. Actuellement de plus en plus de types d'ampoules non incandescentes sont disponibles avec les culots standard E27 (gros diamètre) et E14 (petit diamètre).

Effectuer les mesures de l'ampoule «économique», ainsi que des trois types d'ampoule à LED disponibles. On prendra aussi le spectre des lampes à néon du plafond du labo.

- Ces sources présentent-elles un spectre du type « corps noir ? ».
- Evaluer la CCT de chaque lampe et la comparer à celle d'une ampoule à incandescence.
- Estimez aussi le rendement lumineux dans le visible.
Quelles hypothèses doit-on faire pour permettre ce calcul ?

5 Filtres

Les filtres représentent un domaine extrêmement vaste en applications de l'optique.

Il est demandé d'effectuer un exercice de mesure d'un filtre interférométrique dans le vert qu'on avait déjà évalué en labo d'optique avec l'interféromètre de Michelson.

Le principe est le suivant :

1. On enregistre d'abord le spectre d'une source à spectre étendu sans filtre.
2. Ensuite avec le filtre.
3. Le rapport des spectres donne ainsi la réponse spectrale du filtre, qu'on pourra comparer avec celle donnée par le fabricant.

Le montage est très simple et illustré dans la photo en couverture. Il faut prendre garde que **la pose du filtre ne diaphragme pas le faisceau** particulièrement par rapport à la situation sans filtre. Pour cela on laissera la même monture sans filtre pour la prise de référence de la situation sans filtre.

La lampe avec lentille disponible produit un faisceau (très) approximativement parallèle. Ensuite la lumière traverse le filtre et une lentille qui la fait ensuite converger vers l'entrée de la petite sphère intégrante. Pour mesurer la situation de référence sans filtre on enlèvera le filtre de la monture.

Ce type de mesure relative peut en principe être fait aussi en mode S. On enregistrera les deux fichiers .trt (sans et avec filtre) que l'on traitera dans Excel ou Matlab pour en calculer le rapport.

Il est aussi possible d'effectuer une mesure directe en **mode T**. Pour cela il faudra sauver le spectre sans filtre comme référence : menu *File-> Save -> Reference*. Passer ensuite en mode T et le spectre (sans filtre) devrait montrer 100% partout. Poser le filtre et on aura directement le spectre transmis. Noter que dans certaines bandes de fréquence on aura une mesure affectée par un bruit élevé qu'il conviendra de lisser. Effectuer et comparer la mesure par **les deux méthodes**.

- La **bande passante** du filtre sera caractérisé en termes de largeur à mi-hauteur (*Full Width Half Maximum – FWHM*).
- Calculer ensuite la **longueur** et le **temps de cohérence** de la lumière filtrée (référence au cours d'optique).

4. Distribution du travail

Ce TP sera généralement réalisé en équipe de 2 (ou 3) personnes.

Chaque groupe est évidemment libre de s'organiser: toutefois on suggère que :

- au moins une personne se dédie déjà durant la manip aux calculs par Excel ou Matlab de support et compréhension des résultats trouvés ;
- au moins une personne vérifie que toute la procédure est entièrement et bien suivie et prene des notes, des mesures et des croquis exhaustifs durant la manip ;
- au moins une personne soigne particulièrement le montage et les mesures, prene des photos, etc..

Le rapport peut être rédigé en se partageant le travail mais il devra être revu et corrigé avant livraison par tous les membres.

Il est en tout cas primordial que **tous les membres de l'équipe maîtrisent tous les aspects**, à la fois pratiques et théoriques, de ce travail pratique.

ANNEXE

Loi de Planck (spectre d'émission d'un corps noir)

$$L = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)} - 1}$$

avec:

λ = longueur d'onde [m]

$c_1 = 3.74 \cdot 10^{-16}$ W m

$c_2 = 1.44 \cdot 10^{-2}$ m K

T = température du corps noir [K]