

# Absorption optique

Pierrot Lamontagne

## Résumé

*Le but de l'expérience est d'utiliser un spectromètre pour mesurer différentes quantités physiques. Nous déterminons la densité électronique d'un échantillon d'or à  $n_e = (4.14 \pm 0.03) \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$  avec sa fréquence plasma. Nous trouvons l'énergie de gap direct  $(2.01 \pm 0.01 \text{ eV})$  et indirect  $(1.94 \pm 0.02)$ . Par la suite, nous tentons de déterminer l'épaisseur de différentes couches minces en utilisant le concept de milieux diélectriques. Nous faisons aussi varier l'angle incident du faisceau pour étudier la variation de l'épaisseur trouvée. La variation obtenue ne correspondait pas aux attentes, mais nous suspectons que ceci est dû à une tâche lumineuse que nous avons remarqué lors de la prise de mesure. Finalement, nous détectons les raies d'absorption de la chlorophylle  $(698 \pm 2) \text{ nm}$  et de la carotène  $(461 \pm 1) \text{ nm}$  en analysant le spectre d'une feuille morte et d'une feuille vivante.*

## 1 Introduction

La spectroscopie optique est une manière d'analyser un signal lumineux en fonction de sa longueur d'onde. Dans notre cas, une source de lumière blanche passe à travers divers échantillons pour ensuite entrer dans le spectromètre par une fibre optique multimode. Dans un premier temps, nous voulons déterminer la résolution du spectromètre en mesurant un spectre bien connu, celui de la lampe à sodium. Dans un second temps, il est question de déterminer l'énergie de gap ainsi que l'énergie des phonons d'un échantillon de GaSe. Ensuite, nous voudrions trouver la densité de particules d'or dans un échantillon en déterminant la fréquence plasma de celui-ci par l'entremise de son spectre. Le prochain objectif est de déterminer l'épaisseur d'une couche mince faite de  $\text{TiO}_2$  en comparant les spectres obtenus à la suite du passage de la lumière par la couche et un modèle théorique du formalisme de transmission multicouches. Cette exercice est répété pour différents orientations du verre. De cette manière, on obtient des épaisseurs différentes pour chaque angle. Finalement, nous avons fait passer la lumière blanche à travers une feuille d'arbre vivante et une feuille d'arbre morte afin de détecter une raie d'absorption de la chlorophylle et de la carotène. Dans ce rapport, nous commencerons par introduire quelques éléments théoriques nécessaires, puis nous décrirons le montage utilisé lors de l'expérience. Nous discuterons ensuite des résultats obtenus et nous finirons avec une brève conclusion.

## 2 Théorie

Plusieurs concepts reliés à l'optique et la matière condensée sont utiles dans cette expérience. En optique, on parle de spectroscopie et de filtres diélectriques et en matière condensée il est question de la fréquence plasma et de l'énergie de gap.

La spectroscopie consiste en l'étude de la dispersion de la lumière sur différentes longueurs d'ondes. Un spectrographe sert donc à mesurer l'intensité lumineuse d'une source sur une plage de longueur d'onde donnée.

Les données spectroscopiques qui en ressortent se nomment "spectre" et c'est ce que nous étudions ici.

Lorsque un faisceau lumineux passe à travers différents milieux, l'intensité et la polarisation des rayons transmis et réfléchis est modifiée. Il existe un formalisme matriciel qui permet de traiter ces changements. Un vecteur champ électrique se voit modifié par une matrice de transmission.

$$E^0 = ME^k \quad \text{où} \quad M = I^0 T^1 I^1 T^2 \dots T^{k-1} I^{k-1} \quad (1)$$

Les matrices  $I$  correspondent au passage de la lumière par un interface séparant deux milieux d'indice de réfraction différents et les matrices  $T$  correspondent au passage des photons dans un milieu uniforme.

$$T^i = \begin{bmatrix} e^{-i\delta_i} & 0 \\ 0 & e^{i\delta_i} \end{bmatrix} \quad \text{où} \quad \delta_i = \frac{4\pi d_i n_i \cos \theta_i}{\lambda_0} \quad (2)$$

$$I_p^i = \frac{\cos \theta_{i+1}}{\cos \theta_i} \begin{bmatrix} \frac{i}{t_i} & \frac{r_i}{t_i} \\ \frac{r_i}{t_i} & \frac{1}{t_i} \end{bmatrix} \quad (3)$$

où  $t_i$  et  $r_i$  sont obtenus par les équations de Fresnel.

La réflectance et la transmittance des filtres diélectriques peut ensuite être obtenus à partir du vecteur champ électrique  $E_0$ . [1]

$$R = |t|^2, \quad T = \frac{n_k \cos \theta_k}{n_0 \cos \theta_0} |t|^2 \quad (4)$$
$$\text{où} \quad r = \frac{E_-^0}{E_+^0}, \quad t = \frac{1}{E_+^0}$$

L'un de ces milieux diélectrique est la couche mince : une couche atomique de matériaux modifiant le comportement de la lumière la traversant. On s'intéresse à ce type d'objet dans cette expérience.

En matière condensée, la fréquence de plasma est  $\omega_{pe}$  est causée par une oscillation de la densité d'électron

dans un matériau conducteur.[2] La fréquence plasma de l'or se trouve dans le visible. Puisque  $\omega_{pe}$  dépend de la densité électronique, on peut isoler cette dernière dans l'équation.

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}} \quad \text{où} \quad \omega_{pe} = \frac{2\pi c}{\lambda_{pe}} \quad (5)$$

$$n_e = \left( \frac{2\pi c}{\lambda_{pe}} \right)^2 \frac{m_e \epsilon_0}{e^2}$$

Un autre concept important en matière condensée est l'énergie de gap. C'est l'énergie nécessaire pour qu'un électron de valence passe de la bande de valence à la bande de conduction dans un solide. L'électron peut sauter directement la barrière d'énergie s'il en possède suffisamment (gap direct) ou faire appel à un phonon, particule de vibration de la matière (gap indirect). [3]

### 3 Montage et mesures

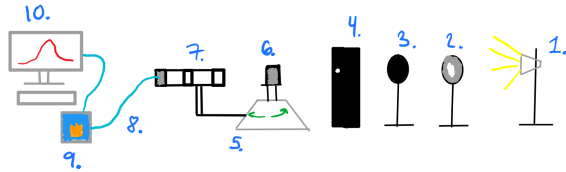


FIGURE 1 1. Lumière blanche/Lampe de sodium, 2. Iris, 3. Polariseur, 4. Panneau noir, 5. Goniomètre, 6. Échantillonneur, 7. Focaliseur, 8. Fibre optique, 9. Spectromètre, 10. Ordinateur

Dans la figure 1, on représente le montage de l'expérience. Celui-ci était le même pour chaque sous-expérience. Dans un premier temps, une source lumineuse (1) (blanche ou de sodium) émet à travers un iris (2) servant à diminuer l'intensité lumineuse, puis un polariseur (3) qui a le même rôle. La lumière résultante traverse ensuite un trou dans un panneau noir (4) qui dirige le cône de lumière vers un échantillonneur (6) posé sur un goniomètre (5). C'est sur cet échantillonneur que l'on vient poser différents échantillons dépendamment de l'expérience (or, GaSe, couches minces, feuille). Le goniomètre nous permet de changer l'angle incident du faisceau lumineux. Le focaliseur (7) dirige finalement la lumière vers l'entrée de la fibre optique (8) qui, elle, transmet les photons vers le spectromètre (9). À ce moment, on peut visualiser le spectre en temps réel sur l'ordinateur (10).

La première mesure nécessaire est celle du spectre du doublet de sodium. On remplace donc la source blanche par une lampe de sodium et on enregistre un spectre sur l'ordinateur. La seconde sous-expérience consiste à

déterminer la densité électronique d'un échantillon d'or en observant sa longueur d'onde plasma  $\lambda_{pe}$ . Afin de prendre un spectre de l'or, nous plaçons tout simplement l'échantillon d'or sur l'échantillonneur. Nous enregistrons ensuite un spectre. Il est important de noter que pour chaque spectre mesuré, nous devons prendre un spectre "blanc" sans l'échantillon afin de calibrer les données par la suite. Afin de déterminer l'énergie de gap/phonon du GaSe, le principe est le même. On place l'échantillon de GaSe sur l'échantillonneur et on prend un spectre. Le plus grand nombre de mesures est pris lorsque l'on s'intéresse à déterminer l'épaisseur d'une couche mince. Dans un premier temps, on prend des spectres de lumière pour 3 couches minces d'épaisseur différentes. Par la suite, nous prenons des spectres de la couche mince numéro 2 avec différents angles incidents afin d'étudier le changement d'épaisseur résultant. Pour ce faire, nous effectuons une série de rotation d'environ  $2^\circ$ .

Finalement, il est question de détecter une raie d'absorption de la chlorophylle ( $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$ ) et de la carotène ( $C_{40}H_{56}$ ). Il suffit donc de faire passer le faisceau lumineux à travers une feuille vivante pour détecter la chlorophylle et une feuille morte pour détecter la carotène (les feuilles mortes ont perdu leur chlorophylle[4]). Nous plaçons donc les feuilles respectives sur l'échantillonneur et enregistrons deux spectres.

## 4 Résultats

### 4.1 Doublet de sodium

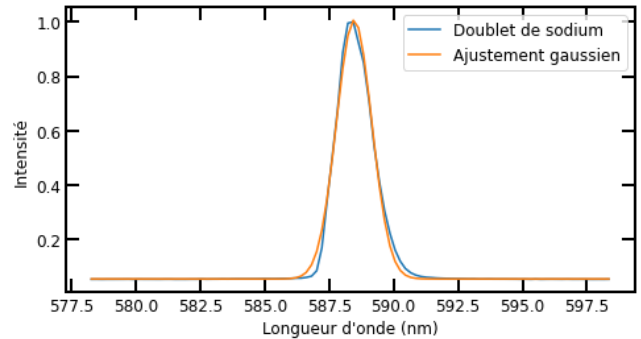


FIGURE 2 Fit Gaussien sur le doublet de sodium. L'écart-type de la distribution nous permet de déterminer la résolution du spectromètre

Afin de déterminer la résolution du spectromètre, nous mesurons le doublet de sodium pour lequel nous connaissons très bien la valeur. La valeur obtenue nous permet de déterminer l'incertitude de n'importe quelle mesure de longueur d'onde sachant la résolution :  $\Delta\lambda = \frac{\lambda}{R}$ . Ainsi, en faisant un ajustement gaussien sur le doublet comme montré dans la figure (2), on peut prendre l'écart-type de celui-ci pour l'incertitude  $\Delta\lambda$ , prendre le maximum pour  $\lambda$  et isoler la résolution dans l'équation

plus-haut. Nous trouvons une résolution de  $R = 366$ .

#### 4.2 Densité électronique de l'or

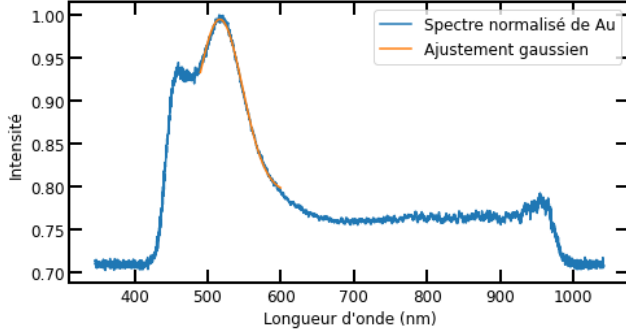


FIGURE 3 Pic d'absorption de l'or. La longueur d'onde correspondante nous permet de trouver la densité électronique de l'or

En faisant passer la lumière blanche par un échantillon d'or, nous pouvons identifier sa densité électronique en observant à quel longueur d'onde se trouve le pic d'absorption causé par la vibration des électrons à la fréquence plasma. En normalisant le spectre et en effectuant un ajustement gaussien sur le pic montré à la figure 3, nous obtenons une longueur d'onde plasma de  $\lambda_{pe} = (516 \pm 2) \text{ nm}$ . En utilisant, l'équation (5), nous obtenons ensuite une densité électronique de  $n_e = (4.14 \pm 0.03) \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$  pour l'échantillon d'or. La valeur théorique est  $n_e = 5.9 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ . [5]

#### 4.3 Énergie de gap du GaSe

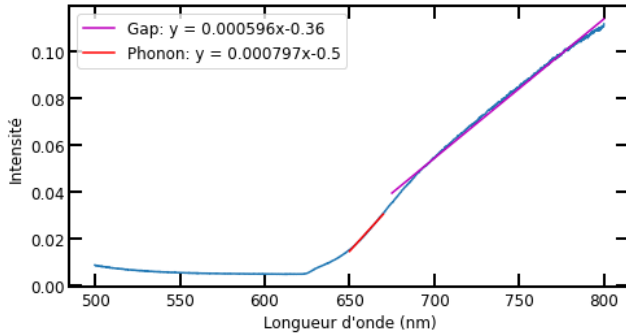


FIGURE 4 Régression linéaires sur le spectre du GaSe permettant de trouver les énergie de gap et de phonons

Dans cette section, notre objectif est de déterminer l'énergie de gap nécessaire pour que les électrons de valence du GaSe sautent sur la bande de conduction. Comme discuté dans la section théorique, à défaut de ne pas avoir suffisamment d'énergie pour changer de bande, les électrons peuvent acquérir un phonon pour se doter de l'énergie nécessaire. Ici, notre but est de déterminer à la fois l'énergie de gap et l'énergie des phonons.

Dans la figure 4, on observe la plage de longueur d'onde critique où les photons incidents ont soudainement assez d'énergie pour exciter les électrons et les pousser sur la bande de conduction. À partir de ce point, presque aucun photon réussi à traverser l'échantillon puisque ceux-ci sont absorbés. On remarque cependant que près du point critique, la pente de la courbe semble s'accroître. Ceci est dû aux phonons qui permettent aux électrons de s'échapper prématurément. En ajustant une droite sur ces deux plages de longueurs d'onde, on peut déterminer à quelle longueur d'onde ceux-ci interceptent le flux nul et ainsi déterminer les énergies avec l'équation  $E = \frac{hc}{\lambda}$ . Nous avons obtenu :

| Énergie      | Expérimental               |
|--------------|----------------------------|
| $E_{gap}$    | $2.01 \pm 0.01 \text{ eV}$ |
| $E_{phonon}$ | $0.07 \pm 0.01 \text{ eV}$ |

La valeur théorique de l'énergie de gap indirect, c'est-à-dire  $E_{gap} - E_{phonon}$  est de  $E_{th} = 2.1$  [6]. Nous avons  $E_{exp} = 1.94 \pm 0.02$ . L'erreur relative pourrait être dû à l'impureté de notre échantillon.

#### 4.4 Épaisseur de couches minces

Ici, nous voudrions déterminer l'épaisseur de différentes couches minces avec différents angles incidents grâce au formalisme matriciel introduit dans la section théorique. On peut optimiser le paramètre  $d$  pour que la périodicité de la fonction résultante concorde avec les données. La figure 5 montre un exemple où l'on veut déterminer l'épaisseur optimale.

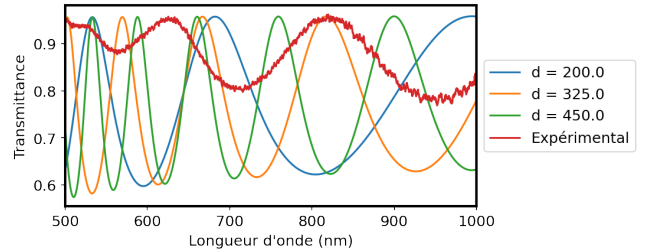


FIGURE 5 Le spectre expérimental d'une couche mince superposé à des spectres théoriques à  $d$  données.

En répétant ce processus pour les trois couches minces fournies, on obtient les résultats suivants :

|   | Épaisseur (nm)          |
|---|-------------------------|
| 1 | $240 \pm 10 \text{ nm}$ |
| 2 | $450 \pm 10 \text{ nm}$ |
| 3 | $440 \pm 10 \text{ nm}$ |

Nous avons estimé l'incertitude à 10 nm, car c'est à partir de cette quantité que l'on pouvait voir une différence notable sur la fonction théorique. Par la suite, nous voulons déterminer comment l'épaisseur optimale varie en fonction de l'angle du faisceau incident. La figure 6 nous montre la relation lors que cette analyse.

La courbe théorique représente la manière dont on s'attendrait à ce que l'épaisseur varie selon Snell-Descartes et de la trigonométrie. On peut voir que la tendance ne va pas du tout comme on s'y attendrait, sauf au centre où on aperçoit une forme parabolique qui est trop accentuée. On remarque tout de même que le vrai zéro du goniomètre était  $6^\circ$  à côté de celui qu'on avait estimé. Nous suspectons que cette erreur est dû à une tâche lumineuse sur le bord du faisceau central qui aurait pu contrebalancer l'effet d'augmentation de l'épaisseur.

$$d = \frac{d_0}{\cos \theta_2} \quad \text{où} \quad \theta_2 = \arcsin \left( \frac{n_{\text{air}} \sin \theta_1}{n_{\text{verre}}} \right) \quad (6)$$

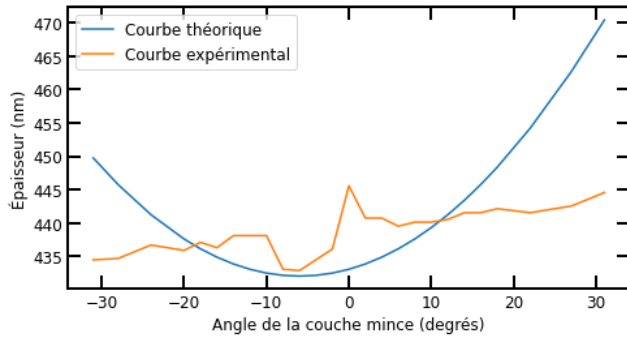


FIGURE 6 Épaisseur de la couche mince en fonction de l'angle incident du rayon lumineux

#### 4.5 Raies d'absorption de la chlorophylle et du carotène

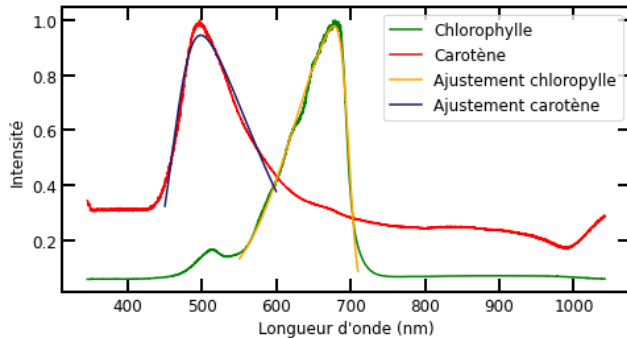


FIGURE 7 Raies d'absorption de la chlorophylle et de la carotène

Finalement, en faisant passer la lumière blanche à travers une feuille vivante et une feuille morte, nous avons tenté de détecter les raies d'absorption de la chlorophylle et de la carotène. Dans la figure 7, nous pouvons voir le signal d'absorption causé par la feuille ainsi que des ajustements de gaussienne penchées. À noter que nous utilisons ces gaussiennes penchées, car les raies d'absorption moléculaire sont asymétriques. Voici les

résultats obtenus pour les raies d'émissions en comparaison avec les valeurs théoriques[7] :

| Molécules    | Expérimental             | Théoriques              |
|--------------|--------------------------|-------------------------|
| Chlorophylle | $(698 \pm 2) \text{ nm}$ | $[650, 675] \text{ nm}$ |
| Carotène     | $(461 \pm 1) \text{ nm}$ | $[400, 500] \text{ nm}$ |

Dans le cas de la chlorophylle, notre pic est légèrement plus énergétique que dans la littérature, mais le pic pour la carotène est dans l'intervalle de confiance.

## 5 Conclusion

Somme toute, nous avons trouvé une résolution du spectromètre de  $R = 366$  en ajustant une gaussienne sur le doublet de sodium. Nous avons trouvé la densité électronique d'un échantillon d'or à  $n_e = (4.14 \pm 0.03) \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$  en utilisant son spectre et le concept de fréquence plasma. Ensuite, nous avons déterminé l'énergie de gap direct  $(2.01 \pm 0.01 \text{ eV})$  et indirect  $(1.94 \pm 0.02)$  du GaSe en étudiant le point critique où le flux devient nul et le concept de phonon. Par la suite, nous avons tenté de déterminer l'épaisseur de différentes couches minces en comparant nos spectres avec les spectres théoriques du formalisme matriciel des filtres diélectriques. Il était ensuite question d'examiner la variation de l'épaisseur en fonction de l'angle incident du faisceau lumineux. La variation obtenue ne correspondait pas aux attentes, mais nous suspectons que ceci est dû à une tâche lumineuse que nous avons remarqué lors de la prise de mesure. Finalement, en faisant passer le faisceau lumineux dans une feuille morte et une feuille vivante, nous avons pu détecter les raies d'absorption de la chlorophylle  $((698 \pm 2) \text{ nm})$  et de la carotène  $((461 \pm 1) \text{ nm})$ . Pour observer d'autres raies d'absorption, nous pourrions attendre que la couleur des feuilles changent pour pouvoir observer la raie d'absorption autour de 500 nm du xanthophyll qui donne la couleur orangée aux feuilles.

## Références

- [1] "Laboratoire d'optique notes de travaux pratiques."
- [2] "Plasma oscillation," July 2022. Page Version ID : 1098426493.
- [3] "Gap direct et gap indirect," Nov. 2020. Page Version ID : 176326230.
- [4] "Why Leaves Change Color."
- [5] "What is the number density of conduction electrons in gold, which is a monovalent metal? Use the molar mass and density provided in Appendix F .."
- [6] H. Huang, P. Wang, Y. Gao, X. Wang, T. Lin, J. Wang, L. Liao, J. Sun, X. Meng, Z. Huang, X. Chen, and J. Chu, "Highly sensitive phototransistor based on GaSe nanosheets," *Applied Physics Letters*, vol. 107, p. 143112, Oct. 2015.
- [7] "Spectres d'absorption des pigments [Nutrition carbonée]."