

Physique des Semiconducteurs : Spectroscopie

Boris Alexandre Baudel - Master I de Physique - Université du Maine

Decembre 2023

Introduction

Dans ce travail sur la spectroscopie et les propriétés optiques des matériaux, nous explorerons les caractéristiques fondamentales des métaux et d'autres matériaux sous l'angle de leur interaction avec la lumière. Nous aborderons les concepts de réflectivité optique, la théorie de Drude, et l'influence de la structure électronique sur les propriétés optiques des matériaux. L'objectif est de comprendre en profondeur les principes physiques régissant la spectroscopie et d'appliquer ces connaissances à l'étude des matériaux variés tels que l'aluminium, le cuivre, et d'autres métaux.

Théorie

Propriétés des Métaux

Les métaux forment à eux seuls une grande classe des matériaux. Outre leurs très bonnes propriétés électriques (grande conductivité électrique) et thermiques (grande conductivité thermique), les métaux possèdent des propriétés optiques tout à fait singulières puisqu'ils réfléchissent très bien la lumière du visible, c'est le fameux éclat métallique. Ce fort pouvoir réflecteur est lié à l'écrantage dans le métal du champ électromagnétique de la lumière par les électrons de conduction. En quelques mots, les électrons de conduction étant très mobiles, très nombreux et très polarisables, à l'entrée d'un champ électromagnétique, le nuage électronique va se polariser fortement de telle sorte à créer un champ dépolarisant contraire à celui incident (provenant de la lumière) ainsi, ces électrons empêchent la lumière de pénétrer et la réfléchissent donc très bien. Pour comprendre quantitativement ce comportement il faut décrire la réponse diélectrique d'un nuage électronique soumis à une onde plane électromagnétique. En première approximation nous adopterons l'approche classique.

Considérons un électron libre d'un métal soumis à un champ électrique (champ E du champ électromagnétique de la lumière) et à une force de frottement.

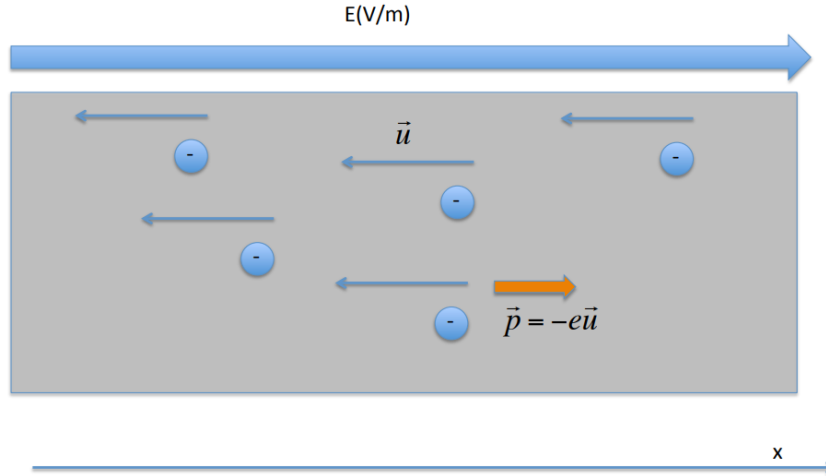


FIGURE 1 – Schématisation de la Polarisation d'un Nuage Électronique

Sous l'influence d'un champ électrique externe (ici onde électromagnétique incidente).

L'équation du mouvement devient alors :

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} = -eE - \alpha \frac{du}{dt} \quad (1)$$

Le champ électrique E est un champ oscillant décrit par $E = E_0 e^{i(\omega t - kx)}$, aussi le déplacement de l'électron aura la même forme à la phase près, avec $u = u_0 e^{i(\omega t - kx)}$. Ainsi, l'amplitude du déplacement prendra la forme suivante :

$$u_0 = \frac{eE_0}{m\omega^2 + i\alpha\omega} \quad (2)$$

La constante diélectrique, celle qui régit la manière dont l'onde électromagnétique incidente va se propager dans le solide, est par ailleurs définie à partir de la susceptibilité électronique χ_e . Pour établir sa relation, nous rappelons les relations élémentaires de l'électromagnétisme dans la matière. Nous avons tout d'abord le vecteur déplacement D tel que :

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad (3)$$

où P est le vecteur polarisation résultant de la polarisation du nuage électronique avec :

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E} = N \mathbf{p} = N \times -e \mathbf{u} \quad (4)$$

Le vecteur polarisation P est en effet la résultante des polarisations p de tous les électrons. Ainsi la susceptibilité électronique devient :

$$\chi_e = -\frac{e^2 N}{\varepsilon_0 (m\omega^2 + i\alpha\omega)} = -\frac{e^2 N}{\varepsilon_0 m} \left(\frac{\omega^2}{\omega^2 + i\frac{\alpha}{m}\omega} \right) \quad (5)$$

La constante diélectrique relative vaut alors :

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\tau} \quad (6)$$

L'indice optique étant défini par $n = \sqrt{\varepsilon_r}$, nous pouvons donc montrer que le coefficient de réflexion optique complexe vaut :

$$r = \frac{n - 1}{n + 1}$$

Le modèle vu précédemment est le modèle dit de Drude. C'est un modèle très simplifié où l'on modélise les propriétés électroniques au travers d'un gaz d'électrons de concentration volumique N . Nous ne faisons pas intervenir la structure électronique précise du métal.

Réflectivité Optique et Métal Transparent

Cette approximation donne une bonne idée de la réflectivité optique d'un métal en décrivant bien qu'un métal réfléchit très bien la lumière pour des longueurs d'ondes supérieures à la longueur d'onde plasma et qu'en dessous de cette longueur d'onde (i.e. au dessus de la fréquence plasma).

Oui un métal, comme l'aluminium peut devenir transparent dans le domaine UV ! Sur la figure 3(a), nous voyons en effet que la réflectivité optique de l'aluminium s'écroule en dessous d'une longueur d'onde située dans l'UV. Ce modèle de Drude ne peut cependant pas expliquer les caractéristiques fines d'un spectre de réflectivité optique.

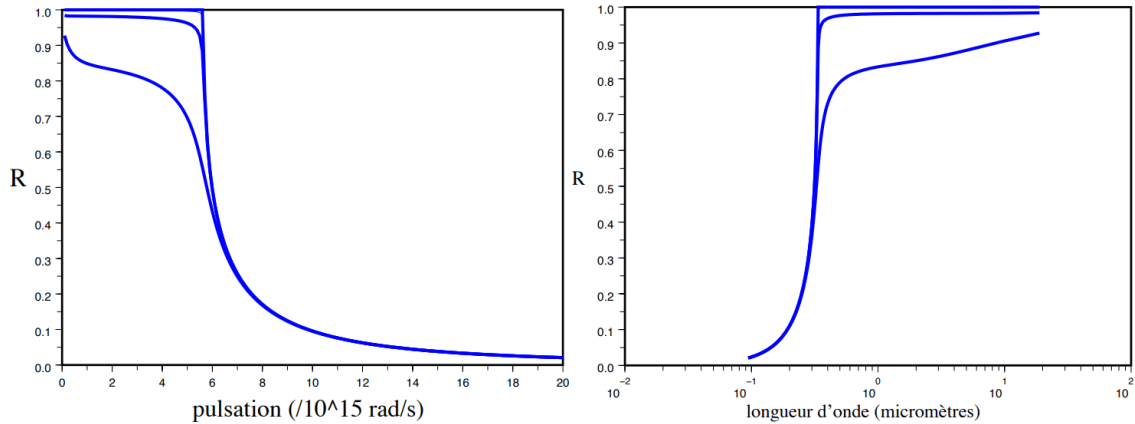


FIGURE 2 – Valeur théorique du coefficient de réflexion optique (amplitude) en fonction de la pulsation et de la longueur d'onde. Nous pouvons voir qu'en dessous de la pulsation plasma (ici 5.1015 rad.s-1) la réflexion optique est parfaite si le temps de vie des électrons est grand.

Le modèle vu précédemment est le modèle dit de Drude. C'est un modèle très simplifié où l'on modélise les propriétés électroniques au travers d'un gaz d'électrons de concentration volumique N . Nous ne faisons pas intervenir la structure électronique précise du métal. Cette approximation donne une bonne idée de la réflectivité optique d'un métal en décrivant bien qu'un

métal réfléchit très bien la lumière pour des longueurs d'ondes supérieures à la longueur d'onde plasma et qu'en dessous de cette longueur d'onde (i.e. au dessus de la fréquence plasma), le gaz d'électron n'arrive plus à suivre les oscillations du champ électrique et donc réfléchit moins bien voire devient transparent. Oui un métal, comme l'aluminium peut devenir transparent dans le domaine UV! Sur la figure 3(a), nous voyons en effet que la réflectivité optique de l'aluminium s'écroule en dessous d'une longueur d'onde située dans l'UV. Cette réponse optique est donc bien à rapprocher de notre modèle décrit en figure 2(b). Ce modèle de Drude ne peut cependant pas expliquer les caractéristiques fines d'un spectre de réflectivité optique. Par exemple sur la figure 3(a,b) il existe des anomalies visible aux alentours de 600nm pour le cuivre et 320nm pour l'argent. Ces anomalies sont directement liées à la structure électronique et plus particulièrement aux transitions électroniques interbandes mettant en jeu des bandes d . Sur la figure 4 est donnée la structure électronique complète du cuivre dans les différentes directions de la zone de Brillouin. Les flèches obliques indiquent les transitions intrabande (excitations des électrons dans la bande de conduction sous l'effet du champ électrique E). La flèche verticale quant à elle décrit une transition vers des niveaux plus profonds (bande d) vers le biveau de Fermi. Ce sont ces transitions qui expliquent la couleur du cuivre

Anomalies dans les Spectres de Réflectivité

Par exemple sur la figure 3(a,b) il existe des anomalies visible aux alentours de 600nm pour le cuivre et 320nm pour l'argent. Ces anomalies sont directement liées à la structure électronique et plus particulièrement aux transitions électroniques interbandes mettant en jeu des bandes d .

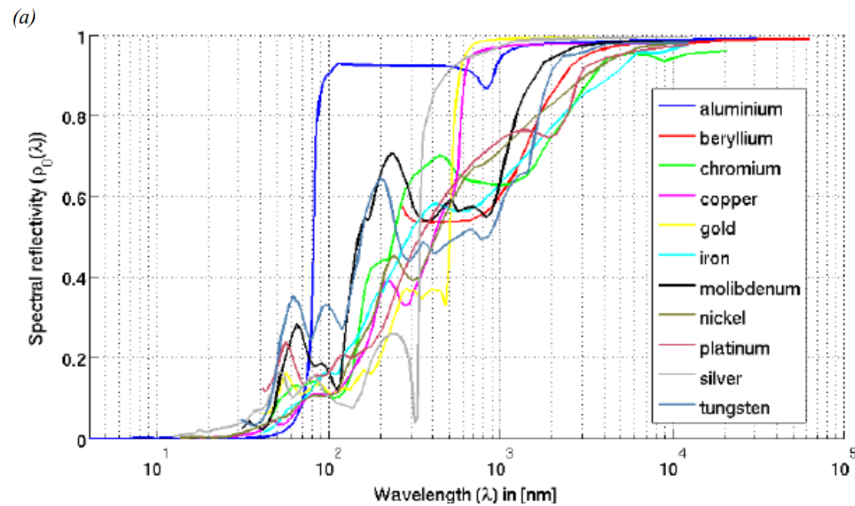


FIGURE 3 – mesure expérimentale du coefficient de réflexion optique de quelques métaux. Ref. Lide D R (ed) 2008 CRC Handbook of Chemistry and Physics 88th edn (Boca Raton, FL : CRC Press)

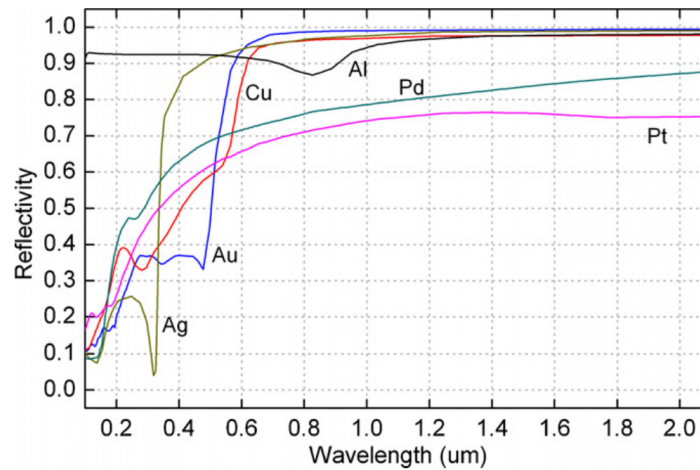


FIGURE 4 – mesure expérimentale du coefficient de réflexion optique de quelques métaux. Ref. Lide D R (ed) 2008 CRC Handbook of Chemistry and Physics 88th edn (Boca Raton, FL : CRC Press)

Nous verrons en Master 1 (second semestre) que la constante diélectrique n'est pas gouvernée uniquement par les électrons libres mais que cette réponse est aussi gouvernée par les électrons liés (liés au sens localisés dans certaines orbitales ou bandes).

L'équation du mouvement devient dans ce modèle appelé Drude-Lorentz :

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} = -eE - \alpha_n \frac{du}{dt} - C_n u \quad (1)$$

où m est la masse de l'électron, u son déplacement, E le champ électrique, α_n le terme d'amortissement, et C_n la constante de raideur élastique.

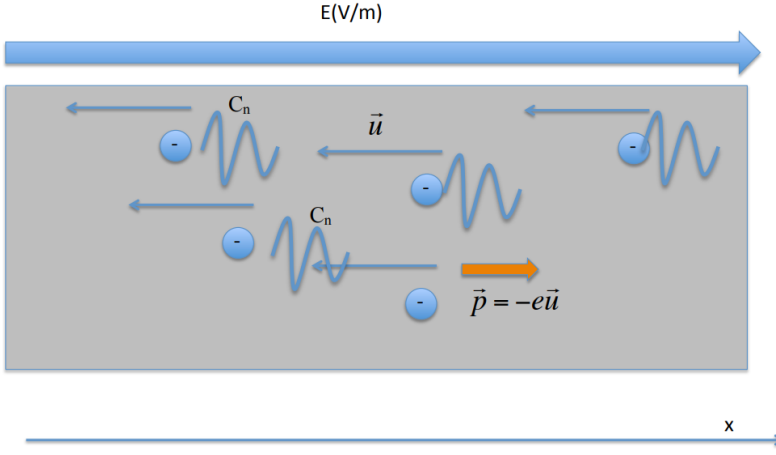


FIGURE 5 – schématisation de la réponse des électrons liés à une sollicitation électrique (E). Les ressorts représentent la notion d'électron lié.

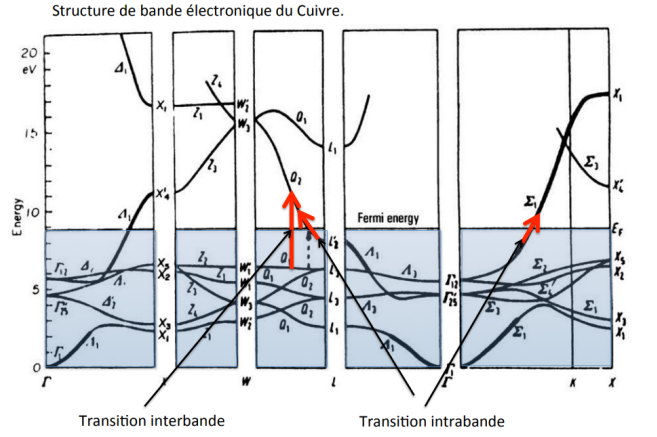


Figure 4 : structure de bande électronique du cuivre. Schématisation des transitions optiques intrabandes et interbandes.

FIGURE 6 – structure de bande électronique du cuivre. Schématisation des transitions optiques intrabandes et interbandes

La susceptibilité devient :

$$\chi_e = \frac{-e^2 N_n}{\varepsilon_0 (m\omega^2 - m\omega_{0,n}^2 + i\alpha_n \omega)} = \frac{-e^2 N_n}{\varepsilon_0 m} \left(\frac{\omega^2 - \omega_{0,n}^2 + i\frac{\alpha_n}{m} \omega}{\omega^2 - \omega_{0,n}^2 + i\alpha_n \omega} \right) \quad (2)$$

avec $\alpha_{n,m} = \frac{\alpha_n}{m}$ et $C_{n,m} = \frac{C_n}{m}$.

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_n^2}{\omega^2 - \omega_{0,n}^2 + i\omega\tau_n\omega} \quad (3)$$

$$= 1 - \frac{\omega_n^2}{\omega^2 - \omega_{0,n}^2 + \omega\tau_n\omega^2 + i\omega_n^2\omega\tau_n\omega} = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \quad (4)$$

L'indice de réfraction devient alors :

$$n = \sqrt{\varepsilon_r} \quad (5)$$

avec $\varepsilon_1 = \Re(\varepsilon_r)$ et $\varepsilon_2 = \Im(\varepsilon_r)$.

Nous voyons donc apparaître un phénomène de résonance proche de la pulsation de résonance ω_0 . Cette résonance est ici associée à un seul oscillateur (C_n), c'est-à-dire à une population électronique donnée N_n .

En conséquence, nous pouvons étendre (sans le démontrer!) le modèle à une expression plus générale de la constante diélectrique impliquant la sommation de différents oscillateurs.

$$\varepsilon_r = 1 - \sum_n \frac{-e^2 N_n}{\varepsilon_0 m} \left(\frac{\omega^2 - \omega_{0,n}^2 + i\omega\tau_n\omega}{\omega^2 - \omega_{0,n}^2 + i\omega\tau_n\omega} \right) = 1 - \sum_n \frac{\omega_n^2}{\omega^2 - \omega_{0,n}^2 + i\omega\tau_n\omega} \quad (6)$$

Afin d'imaginer comment cette réponse diélectrique est maintenant décrite du point de vue quantique, en première approximation (avant de résoudre l'équation de Schrödinger en temps réel), on peut considérer qu'une résonance mécanique donnée associée à la raideur élastique C_n est alors associée à la pulsation caractéristique $\omega_{0,n}$. En terme d'énergie, cela correspond à une transition interbande avec l'énergie associée $E_{n-1} - E_n = \hbar\omega_{0,n}$.

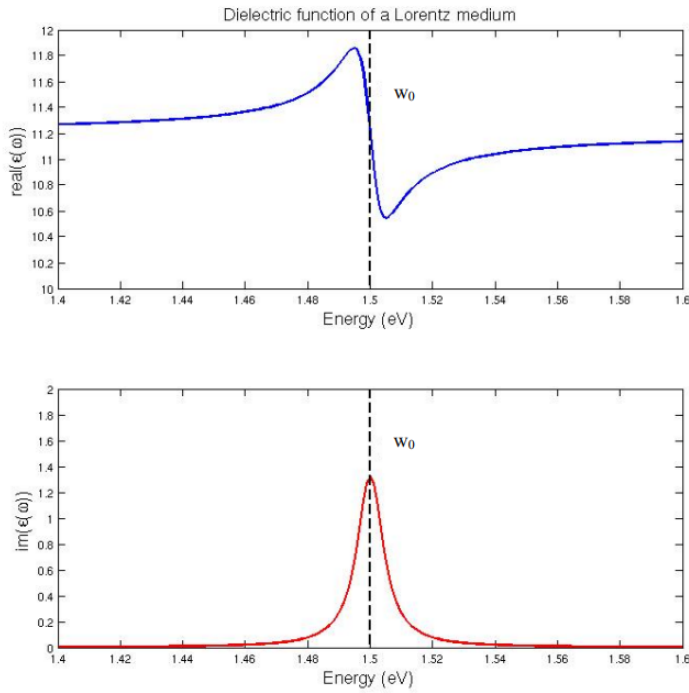


FIGURE 7 – Réponse diélectrique dans le modèle de Drude-Lorentz.

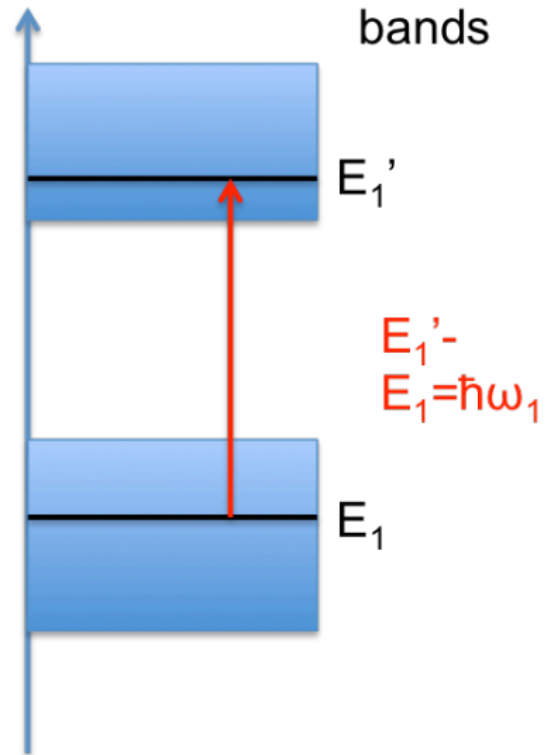


FIGURE 8 – multiple oscillateurs

Couleurs des Matériaux et Transitions Interbandes

Les transitions interbandes (maximum de la partie imaginaire de la constante diélectrique à une fréquence lumineuse incidente spécifique pour laquelle l'énergie électromagnétique est transférée au sous-système électronique) sont responsables des couleurs des matériaux. Bien sûr, si l'énergie électromagnétique (énergie des photons) n'est pas suffisante (c'est-à-dire qu'elle est inférieure à la bande interdite), alors la partie imaginaire de la constante diélectrique s'annule (c'est-à-dire que le matériau devient transparent à ce rayonnement).

Ci-dessous est représentée une structure électronique typique du semi-conducteur GaAs (semi-conducteur à bande interdite directe). Nous avons généralement deux transitions interbandes bien identifiées représentées par les flèches rouges et bleues. La densité d'états étant grande dans la vallée (points L, X), les transitions sont alors plus nettes pour ces points particuliers de la zone de Brillouin.

Expériences

Objectif

L'objectif est de déterminer expérimentalement le coefficient de réflexion optique de différents métaux. Le banc optique dont vous disposez ne permet pas de calibrer en intensité le coefficient de réflexion optique, aussi nous ne ferons pas une mesure absolue du coefficient de réflexion optique. Néanmoins, nous allons voir qu'il est possible de mettre en évidence une dépendance spectrale de la réflexion optique qui dépend de la nature du métal. Nous discuterons en particulier ces propriétés optiques en fonction de la réponse plasma du métal. Une partie de l'analyse ainsi que de la modélisation fera appel à Scilab.

GaAs (semiconductor)

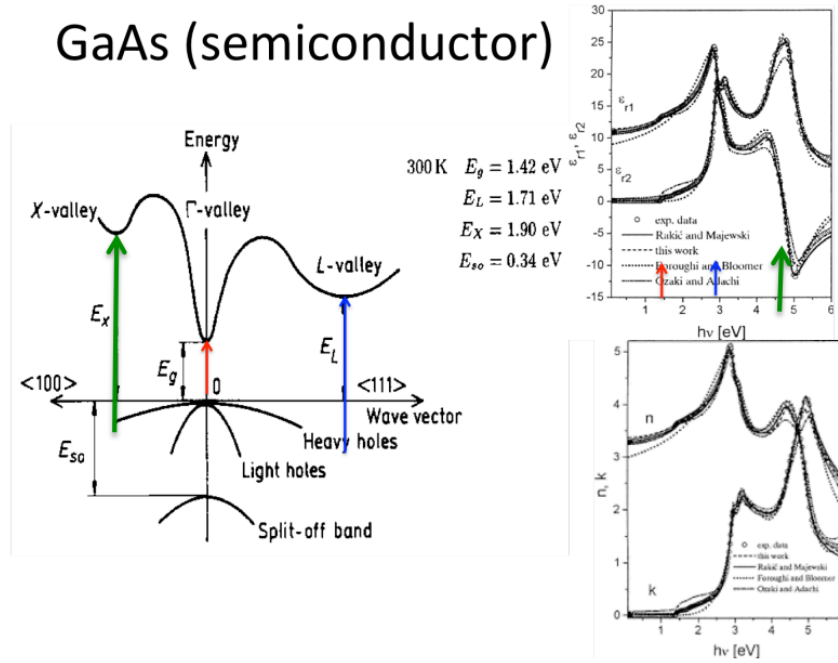


FIGURE 9 – Structure électronique de GaAs et indice diélectrique et de réfraction correspondant en fonction de l'énergie (Adachi, Handbook of semiconductors).

Protocole à Suivre

Les expériences d'optiques

1. Allumer le bloc lampe (interrupteur sur la face arrière). Attendre 15 minutes pour une bonne thermalisation de la lampe. Dans ce bloc lampes, il y a 2 lampes une halogène et l'autre deutérium. Nous travaillerons avec la lampe halogène.
2. Pour mettre en chauffe la lampe Halogène, vous appuyer sur le bouton et un voyant s'allume alors.
3. En dessous il y a un petit interrupteur qui actionne l'ouverture d'une fenêtre pour faire sortir la lumière. Quand cet interrupteur est en position centrale, il n'y a pas de lumière en sortie. Placé en position gauche, la fenêtre est alors ouverte et la lumière. Cette lumière est directement envoyée dans une fibre optique et vous pouvez voir la lumière sortir en plaçant un papier blanc juste devant elle (avant la première lentille).
4. Ouvrir le logiciel d'acquisition (icône sur le bureau du PC). La fenêtre qui s'ouvre fait apparaître la barre de menu suivante :
5. Enregistrer le spectre de référence de la lampe en vous mettant en configuration transmission ($\theta = 90^\circ$). Prendre un temps d'intégration long (60s-90s). Il faut que le spectre soit stable. On le nommera $I_{ref}(\lambda)$ (variable I_{ref} ainsi nommée dans le logiciel d'analyse Scilab). Enregistrer ce fichier (extension .sample) dans le répertoire. Une lampe de bureau peut être utilisée pour un éclairage minimal autour du banc de mesure

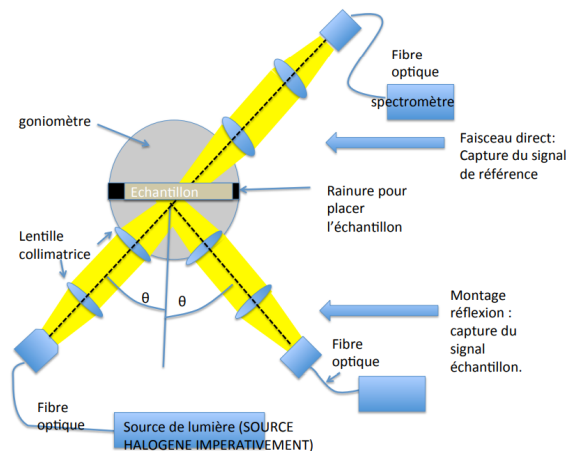


FIGURE 10 – Schéma du montage de réflectivité des matériaux.

Etude rapide des Diodes

Le fichier continue à fournir des informations sur les paramètres de mesure, comme le canal, le temps d'intégration, la moyenne et d'autres paramètres du spectromètre. La ligne "— Measurement Data —" semble indiquer le début des données spectrales proprement dites.

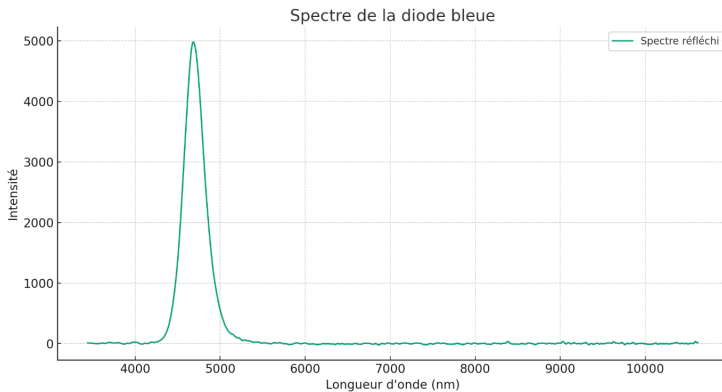


FIGURE 11 – Spectre de la diode bleue

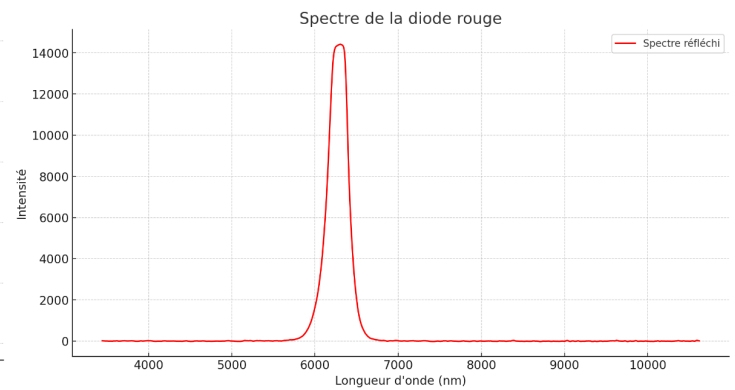


FIGURE 12 – Spectre de la diode rouge

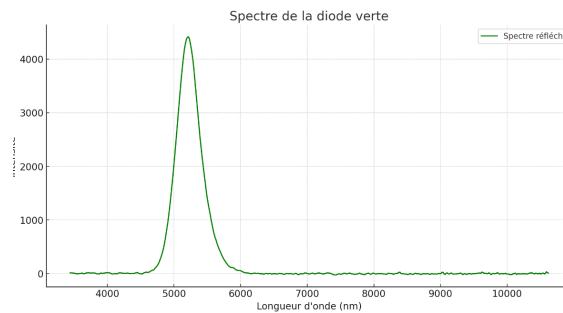


FIGURE 13 – Spectre de la diode verte

Les données sont cohérentes avec les longueurs d'onde des Lasers des différentes couleurs. En revanche, il y a une erreur dans les données. En effet, évidemment, il faut enlever un 0 dans les longueurs d'onde (erreurs dans une formule). Sinon, les valeurs sont bien bonnes et cohérentes avec la couleur des lasers.

Etude spectroscopique de l'Acier

De manière assez logique, l'acier réfléchit la plupart des longueurs d'ondes. En effet, la couleur de l'acier est plutôt blanc ce qui signifie que les longueurs d'ondes renvoyées sont plutôt la composition de toutes les longueurs d'ondes. Il y a un écart avec la théorie. (On peut voir ces écarts avec la figure 3)

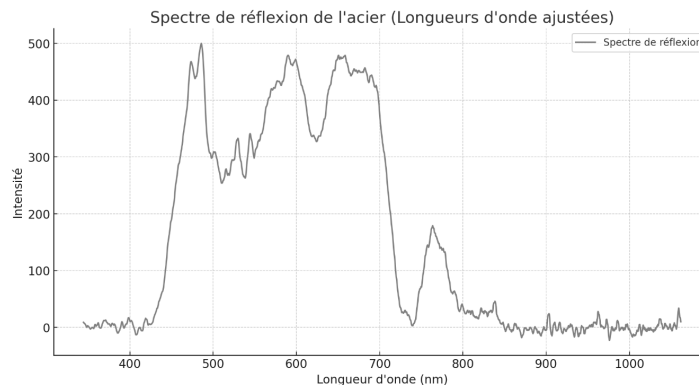


FIGURE 14 – Spectre de réflexion de l'acier

Etude spectroscopique du Laiton

Voici le spectre du Laiton, il ressemble beaucoup à celui de l'or. En effet, le laiton a une couleur similaire à celle de l'or. Il y a un écart avec la théorie. (On peut voir ces écarts avec la figure 3)

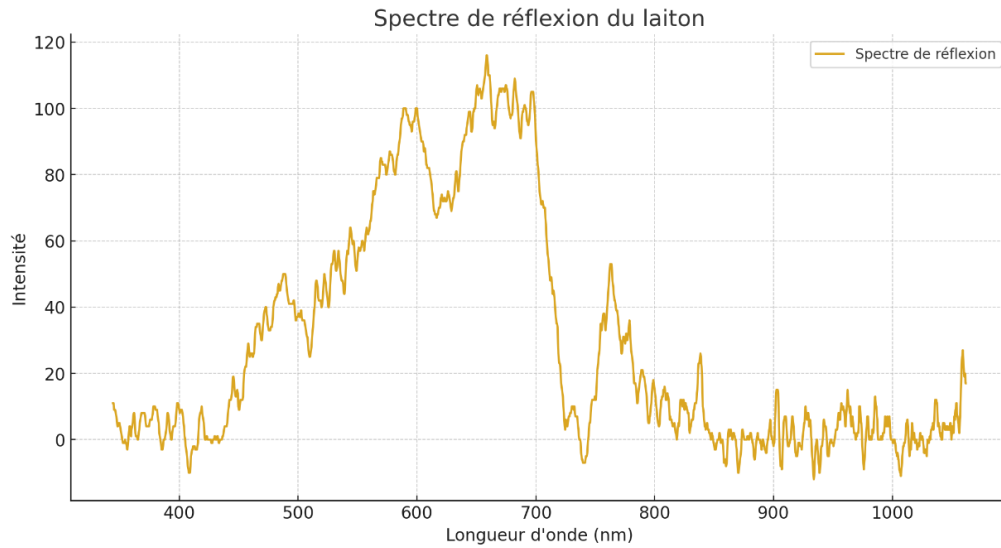


FIGURE 15 – Spectre de réflexion du laiton

Etude spectroscopique de L'Or

Le spectre de l'or est plutôt orienté vers la couleur jaune et donc réfléchit moins vers les 500 nm que l'acier. La couleur moyenne est plutôt jaune. On tient aussi à remarquer que les données ne sont pas de bonnes qualités. Il y a un écart avec la théorie. (On peut voir ces écarts avec la figure 3)

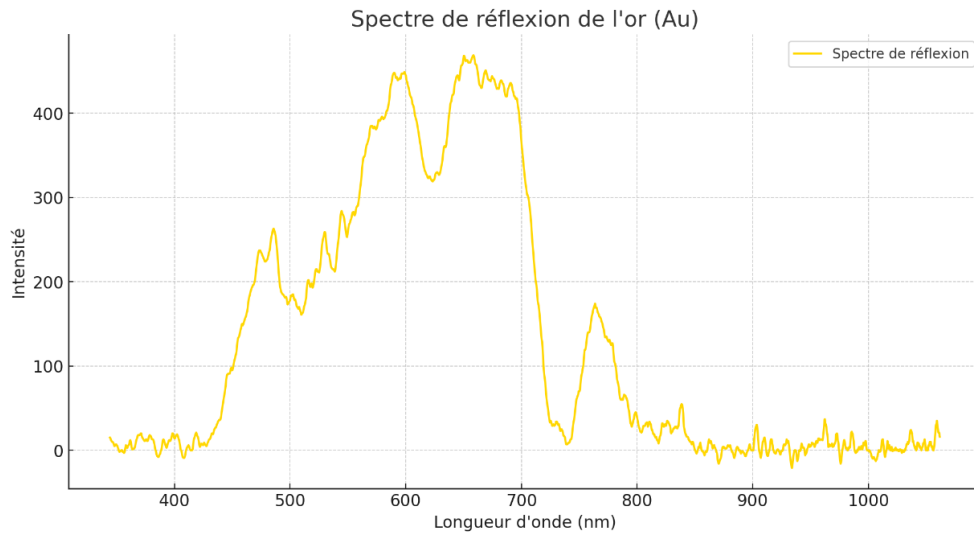


FIGURE 16 – Spectre de réflexion de l'Or.

Etude spectroscopique du Cuivre

Le cuivre renvoie une couleur plutôt orangé donc son spectre de réflexion se rapproche plus de ces longueurs d'ondes. Il y a un écart avec la théorie. (On peut voir ces écarts avec la figure 3). Nous faisons la même chose pour le cuivre et on obtient le spectre suivant :

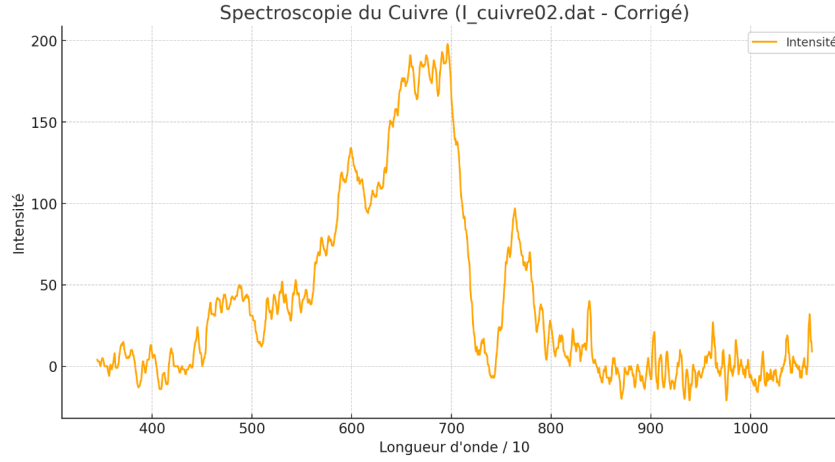


FIGURE 17 – Spectre de réflexion du cuivre

Exploitation des données et modèle de Drude

La fréquence plasma est une caractéristique clé des métaux, dépendant de la densité d'électrons libres et de la masse effective des électrons. Elle joue un rôle crucial dans la réflectivité optique des métaux, en particulier en déterminant le point où le spectre de réflexion atteint un minimum.

La fréquence plasma ω_p est donnée par la formule :

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m^*}}$$

où :

- N est la densité des électrons,
- e est la charge de l'électron,
- ϵ_0 est la permittivité du vide,
- m^* est la masse effective des électrons.

Le modèle de Drude est utilisé pour simuler la réflectivité optique des métaux. Ce modèle relie la permittivité complexe $\epsilon(\omega)$ à la fréquence du champ électromagnétique incident, à la fréquence plasma et au temps de relaxation des électrons τ .

La permittivité complexe selon le modèle de Drude est donnée par :

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega/\tau}$$

où :

- ϵ_∞ est la permittivité à haute fréquence,
- ω est la fréquence de la lumière incidente.

La réflectivité $R(\omega)$ à la surface d'un métal peut être calculée à partir de la permittivité par :

$$R(\omega) = \left| \frac{\epsilon(\omega) - 1}{\epsilon(\omega) + 1} \right|^2$$

En mesurant la réflectivité et en la comparant avec le modèle théorique, on peut déterminer les propriétés électriques des métaux, notamment leur fréquence plasma et leur temps de relaxation des électrons.

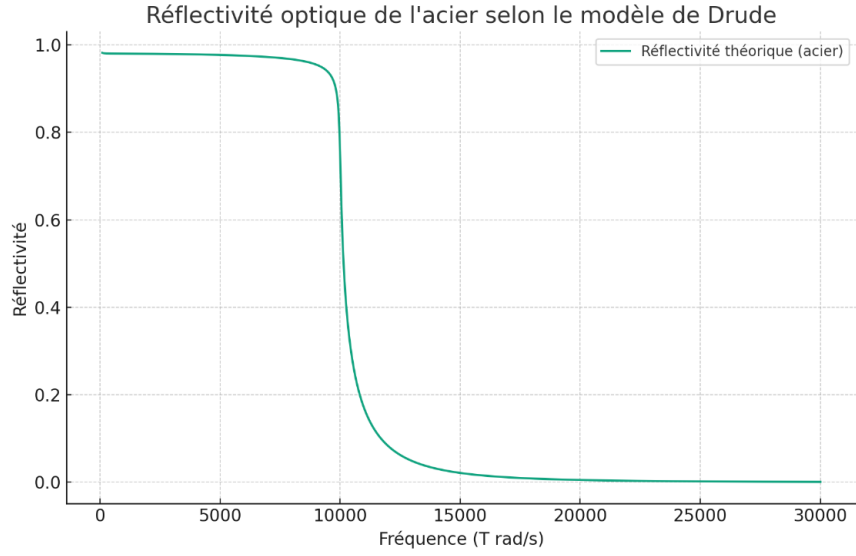


FIGURE 18 – Réflectivité (normalisé) de l'acier selon le modèle de Drude

La fonction de coût, Sum of Squared Errors (SSE), est utilisée pour mesurer la différence entre les valeurs théoriques et expérimentales :

$$SSE = \sum_{i=1}^n (R_{\text{exp}}(\omega_i) - R_{\text{th}}(\omega_i; \theta))^2$$

où :

- $R_{\text{exp}}(\omega_i)$ est la réflectivité expérimentale mesurée à la fréquence ω_i .
- $R_{\text{th}}(\omega_i; \theta)$ est la réflectivité théorique calculée à la fréquence ω_i en utilisant les paramètres θ (qui comprend N , m^* , τ , ϵ_{∞}).

Optimisation des Paramètres

Les paramètres à optimiser dans le modèle de Drude sont :

- Densité d'électrons N
- Masse effective des électrons m^*
- Temps de relaxation des électrons τ
- Permittivité à haute fréquence ϵ_{∞}

Pour chaque ensemble de paramètres θ , calculez $R_{\text{th}}(\omega_i; \theta)$ en utilisant le modèle de Drude et comparez-le avec $R_{\text{exp}}(\omega_i)$ en utilisant la fonction de coût SSE.

Algorithmes d'Optimisation

Gradient Descendant : Ajuste les paramètres dans la direction opposée au gradient de la fonction de coût.

Conclusion

À travers nos études spectroscopiques, nous avons pu observer comment les propriétés optiques des matériaux, telles que la réflectivité et la transparence, sont influencées par leur structure électronique. Les résultats obtenus illustrent clairement l'application de la théorie de Drude et révèlent des aspects intéressants, comme la transparence de certains métaux dans l'UV. Ces connaissances enrichissent notre compréhension des interactions lumière-matière et ouvrent des perspectives pour des applications pratiques dans des domaines comme l'optoélectronique et la conception de matériaux.

Annexe - Programme Python

Bleue

```
1 # Ouvrir et examiner le contenu du fichier pour comprendre son format et ses donn es
2 file_path = '/mnt/data/diode_bleu.dat'
3
4 # Lire les premi res lignes du fichier pour avoir un aper u de son contenu
5 with open(file_path, 'r') as file:
6     first_lines = [next(file) for _ in range(5)]
7
8 first_lines
9 # Lire davantage du fichier pour identifier le format des donn es spectrales
10 with open(file_path, 'r') as file:
11     # Ignorer les premi res lignes d'en-t te et lire les lignes suivantes pour les donn es
12     lines = file.readlines()
13
14 # Extraire une partie des lignes de donn es pour l'analyse
15 data_sample_lines = lines[5:15] # Prendre un  chantillon  des lignes de donn es
16 data_sample_lines
17
18 # Trouver l'index o  les donn es spectrales commencent
19 data_start_index = None
20 for i, line in enumerate(lines):
21     if "--- Measurement Data ---" in line:
22         data_start_index = i + 1
23         break
24
25 # V rifier si on a trouv  l'index de d but des donn es
26 data_start_index, lines[data_start_index:data_start_index+5] # Afficher les premi res lignes des donn es
    spectrales
27
28 import pandas as pd
29
30 # Convertir les donn es spectrales en DataFrame
31 # Supposition: les colonnes sont [Pixel, Longueur d'onde, Intensit ]
32 data_lines = lines[data_start_index:] # Extraire les lignes de donn es spectrales
33 data = [list(map(int, line.split())) for line in data_lines]
34 df = pd.DataFrame(data, columns=['Pixel', 'Longueur_d_nde', 'Intensite'])
35
36 df.head() # Afficher les premi res lignes pour v rifier les donn es
37 import matplotlib.pyplot as plt
38
39 # Cr er un graphique pour visualiser le spectre
40 plt.figure(figsize=(12, 6))
41 plt.plot(df['Longueur_d_nde'], df['Intensite'], label='Spectre r fl chi')
42 plt.xlabel('Longueur d\'onde (nm)')
43 plt.ylabel('Intensit ')
44 plt.title('Spectre de la diode bleue')
45 plt.legend()
46 plt.grid(True)
47 plt.show()
```

Red

```
49 # Chemin d'acc s au fichier de la diode rouge
50 file_path_rouge = '/mnt/data/diode_rouge.dat'
51
52 # Lire les premi res lignes du fichier pour avoir un aper u de son contenu
53 with open(file_path_rouge, 'r') as file:
54     first_lines_rouge = [next(file) for _ in range(5)]
55
56 first_lines_rouge
57 # Lire et extraire les donn es spectrales pour la diode rouge
58 with open(file_path_rouge, 'r') as file:
59     lines_rouge = file.readlines()
60
61 # Trouver l'index o  les donn es spectrales commencent
62 data_start_index_rouge = None
63 for i, line in enumerate(lines_rouge):
64     if "--- Measurement Data ---" in line:
65         data_start_index_rouge = i + 1
```

```

66         break
67
68 # Convertir les donn es spectrales en DataFrame
69 data_lines_rouge = lines_rouge[data_start_index_rouge:] # Extraire les lignes de donn es spectrales
70 data_rouge = [list(map(int, line.split())) for line in data_lines_rouge]
71 df_rouge = pd.DataFrame(data_rouge, columns=['Pixel', 'Longueur_d_onde', 'Intensite'])
72
73 df_rouge.head() # Afficher les premi res lignes pour v rifier les donn es
74
75 # Cr er un graphique pour visualiser le spectre de la diode rouge
76 plt.figure(figsize=(12, 6))
77 plt.plot(df_rouge['Longueur_d_onde'], df_rouge['Intensite'], label='Spectre r fl chi', color='red')
78 plt.xlabel('Longueur d\onde (nm)')
79 plt.ylabel('Intensit ')
80 plt.title('Spectre de la diode rouge')
81 plt.legend()
82 plt.grid(True)
83 plt.show()

```

Vert

```

84 # Lire et extraire les donn es spectrales pour la diode verte
85 with open(file_path_vert, 'r') as file:
86     lines_vert = file.readlines()
87
88 # Trouver l'index o les donn es spectrales commencent
89 data_start_index_vert = None
90 for i, line in enumerate(lines_vert):
91     if "--- Measurement Data ---" in line:
92         data_start_index_vert = i + 1
93     break
94
95 # Convertir les donn es spectrales en DataFrame
96 data_lines_vert = lines_vert[data_start_index_vert:] # Extraire les lignes de donn es spectrales
97 data_vert = [list(map(int, line.split())) for line in data_lines_vert]
98 df_vert = pd.DataFrame(data_vert, columns=['Pixel', 'Longueur_d_onde', 'Intensite'])
99
100 df_vert.head() # Afficher les premi res lignes pour v rifier les donn es

```

Cuivre

```

101 # Chemin d'acc s au fichier de spectroscopie de r flexion du cuivre
102 file_path_cuivre = '/mnt/data/I_cuivre.dat'
103
104 # Lire les premi res lignes du fichier pour avoir un aper u de son contenu
105 with open(file_path_cuivre, 'r') as file:
106     first_lines_cuivre = [next(file) for _ in range(5)]
107
108 first_lines_cuivre
109
110 # Lire et extraire les donn es spectrales pour le cuivre
111 with open(file_path_cuivre, 'r') as file:
112     lines_cuivre = file.readlines()
113
114 # Trouver l'index o les donn es spectrales commencent
115 data_start_index_cuivre = None
116 for i, line in enumerate(lines_cuivre):
117     if "--- Measurement Data ---" in line:
118         data_start_index_cuivre = i + 1
119     break
120
121 # Convertir les donn es spectrales en DataFrame
122 data_lines_cuivre = lines_cuivre[data_start_index_cuivre:] # Extraire les lignes de donn es spectrales
123 data_cuivre = [list(map(int, line.split())) for line in data_lines_cuivre]
124 df_cuivre = pd.DataFrame(data_cuivre, columns=['Pixel', 'Longueur_d_onde', 'Intensite'])
125
126 # Ajuster les longueurs d'onde en divisant par 10
127 df_cuivre['Longueur_d_onde'] = df_cuivre['Longueur_d_onde'] / 10
128
129 df_cuivre.head() # Afficher les premi res lignes pour v rifier les donn es
130

```

```

131 # Cr er un graphique pour visualiser le spectre de r flexion du cuivre avec une couleur alternative
132 plt.figure(figsize=(12, 6))
133 plt.plot(df_cuivre['Longueur_d_onda'], df_cuivre['Intensite'], label='Spectre de r flexion', color='orange
    ')
134 plt.xlabel('Longueur d\onda (nm)')
135 plt.ylabel('Intensit ')
136 plt.title('Spectre de r flexion du cuivre')
137 plt.legend()
138 plt.grid(True)
139 plt.show()

```

Acier

```

146 # Ajuster les longueurs d'onde en divisant par 10
147 df_acier['Longueur_d_onda'] = df_acier['Longueur_d_onda'] / 10
148
149 # Recr er le graphique avec les longueurs d'onde ajust es
150 plt.figure(figsize=(12, 6))
151 plt.plot(df_acier['Longueur_d_onda'], df_acier['Intensite'], label='Spectre de r flexion', color='gray')
152 plt.xlabel('Longueur d\onda (nm)')
153 plt.ylabel('Intensit ')
154 plt.title('Spectre de r flexion de l\'acier (Longueurs d\onda ajust es)')
155 plt.legend()
156 plt.grid(True)
157 plt.show()

```

Laiton

```

158 # Chemin d'acc s au fichier de spectroscopie de r flexion du laiton
159 file_path_laiton = '/mnt/data/I_laiton.dat'
160
161 # Lire les premi res lignes du fichier pour avoir un aper u de son contenu
162 with open(file_path_laiton, 'r') as file:
163     first_lines_laiton = [next(file) for _ in range(5)]
164
165 first_lines_laiton
166 # Lire et extraire les donn es spectrales pour le laiton
167 with open(file_path_laiton, 'r') as file:
168     lines_laiton = file.readlines()
169
170 # Trouver l'index o les donn es spectrales commencent
171 data_start_index_laiton = None
172 for i, line in enumerate(lines_laiton):
173     if "--- Measurement Data ---" in line:
174         data_start_index_laiton = i + 1
175     break
176
177 # Convertir les donn es spectrales en DataFrame
178 data_lines_laiton = lines_laiton[data_start_index_laiton:] # Extraire les lignes de donn es spectrales
179 data_laiton = [list(map(int, line.split())) for line in data_lines_laiton]
180 df_laiton = pd.DataFrame(data_laiton, columns=['Pixel', 'Longueur_d_onda', 'Intensite'])
181
182 # Ajuster les longueurs d'onde en divisant par 10
183 df_laiton['Longueur_d_onda'] = df_laiton['Longueur_d_onda'] / 10
184
185 df_laiton.head() # Afficher les premi res lignes pour v rifier les donn es
186
187 # Lire et extraire les donn es spectrales pour le laiton
188 with open(file_path_laiton, 'r') as file:
189     lines_laiton = file.readlines()
190
191 # Trouver l'index o les donn es spectrales commencent
192 data_start_index_laiton = None
193 for i, line in enumerate(lines_laiton):
194     if "--- Measurement Data ---" in line:
195         data_start_index_laiton = i + 1
196     break
197
198 # Convertir les donn es spectrales en DataFrame
199 data_lines_laiton = lines_laiton[data_start_index_laiton:] # Extraire les lignes de donn es spectrales
200 data_laiton = [list(map(int, line.split())) for line in data_lines_laiton]

```

```

201 df_laiton = pd.DataFrame(data_laiton, columns=['Pixel', 'Longueur_d_onde', 'Intensite'])
202
203 # Ajuster les longueurs d'onde en divisant par 10
204 df_laiton['Longueur_d_onde'] = df_laiton['Longueur_d_onde'] / 10
205
206 df_laiton.head() # Afficher les premi res lignes pour v rifier les donn es
207
208 # Cr er un graphique pour visualiser le spectre de r flexion du laiton
209 plt.figure(figsize=(12, 6))
210 plt.plot(df_laiton['Longueur_d_onde'], df_laiton['Intensite'], label='Spectre de r flexion', color='
goldenrod')
211 plt.xlabel('Longueur d\'onde (nm)')
212 plt.ylabel('Intensit ')
213 plt.title('Spectre de r flexion du laiton')
214 plt.legend()
215 plt.grid(True)
216 plt.show()

```

Or

```

221 # Chemin d'acc s au fichier de spectroscopie de r flexion de l'or
222 file_path_au = '/mnt/data/I_Au.dat'
223
224 # Lire les premi res lignes du fichier pour avoir un aper u de son contenu
225 with open(file_path_au, 'r') as file:
226     first_lines_au = [next(file) for _ in range(5)]
227
228 first_lines_au
229
230 # Lire et extraire les donn es spectrales pour l'or
231 with open(file_path_au, 'r') as file:
232     lines_au = file.readlines()
233
234 # Trouver l'index o les donn es spectrales commencent
235 data_start_index_au = None
236 for i, line in enumerate(lines_au):
237     if "--- Measurement Data ---" in line:
238         data_start_index_au = i + 1
239         break
240
241 # Convertir les donn es spectrales en DataFrame
242 data_lines_au = lines_au[data_start_index_au:] # Extraire les lignes de donn es spectrales
243 data_au = [list(map(int, line.split())) for line in data_lines_au]
244 df_au = pd.DataFrame(data_au, columns=['Pixel', 'Longueur_d_onde', 'Intensite'])
245
246 # Ajuster les longueurs d'onde en divisant par 10
247 df_au['Longueur_d_onde'] = df_au['Longueur_d_onde'] / 10
248
249 df_au.head() # Afficher les premi res lignes pour v rifier les donn es
250
251 # Lire et extraire les donn es spectrales pour l'or
252 with open(file_path_au, 'r') as file:
253     lines_au = file.readlines()
254
255 # Trouver l'index o les donn es spectrales commencent
256 data_start_index_au = None
257 for i, line in enumerate(lines_au):
258     if "--- Measurement Data ---" in line:
259         data_start_index_au = i + 1
260         break
261
262 # Convertir les donn es spectrales en DataFrame
263 data_lines_au = lines_au[data_start_index_au:] # Extraire les lignes de donn es spectrales
264 data_au = [list(map(int, line.split())) for line in data_lines_au]
265 df_au = pd.DataFrame(data_au, columns=['Pixel', 'Longueur_d_onde', 'Intensite'])
266
267 # Ajuster les longueurs d'onde en divisant par 10
268 df_au['Longueur_d_onde'] = df_au['Longueur_d_onde'] / 10
269
270 df_au.head() # Afficher les premi res lignes pour v rifier les donn es

```

```

272
273 // MASTER PHYSIQUE UNIVERSITE de Le MANS
274 // P.RUELLO, M. EDELY

```

```

275 // programme d'analyse des spectres de réflectivité optique des matériaux
276
277 // Commenter -> ctrl + D
278 // D commenter -> ctrl + Maj + D
279
280 //////////////////////////////////////////////////
281 // Importation des données du spectre de référence de la lampe
282 filename = "I_ref.dat";
283 data = fscanfMat(filename);
284 data = data(16:$,:);
285
286 nb = data(:,1);
287 lambda_ref = data(:,2);
288 I_ref = data(:,3);
289
290 lambda_ref=lambda_ref/10;
291
292 plot2d(lambda_ref,I_ref,style=[2])
293 //legend(["spectre_diode_bleu"])
294 ////////////////////////////////////////////////// FIN LAMPE
295 //////////////////////////////////////////////////
296
297
298 //////////////////////////////////////////////////
299 // Importation des données du spectre du cuivre
300 //filename_Cu = "I_cuivre02.dat";
301 //data_Cu = fscanfMat(filename_Cu);
302 //data_Cu = data_Cu(16:$,:);
303 //
304 //nb_Cu = data_Cu(:,1);
305 //lambda_Cu = data_Cu(:,2);
306 //I_Cu = data_Cu(:,3);
307 //
308 //lambda_Cu=lambda_Cu/10;
309 //
310 //plot2d(lambda_Cu,I_Cu,style=[5])
311 ////////////////////////////////////////////////// FIN CUIVRE
312 //////////////////////////////////////////////////
313
314
315 //////////////////////////////////////////////////
316 // Importation des données du spectre du laiton
317 //filename_laiton = "I_laiton02.dat";
318 //data_laiton = fscanfMat(filename_laiton);
319 //data_laiton = data_laiton(16:$,:);
320 //
321 //nb_laiton = data_laiton(:,1);
322 //lambda_laiton = data_laiton(:,2);
323 //I_laiton = data_laiton(:,3);
324 //
325 //lambda_laiton = lambda_laiton/10;
326 //
327 //plot2d(lambda_laiton,I_laiton,style=[2])
328 ////////////////////////////////////////////////// FIN LAITON
329 //////////////////////////////////////////////////
330
331
332 //////////////////////////////////////////////////
333 // Importation des données du spectre de l'Or (Au)
334 filename_Au = "I_or.dat";
335 data_Au = fscanfMat(filename_Au);
336 data_Au = data_Au(16:$,:);
337
338 nb_Au = data_Au(:,1);
339 lambda_Au = data_Au(:,2);
340 I_Au = data_Au(:,3);
341
342 lambda_Au=lambda_Au/10;
343
344 plot2d(lambda_Au,I_Au,style=[6])
345 ////////////////////////////////////////////////// FIN OR
346 //////////////////////////////////////////////////
347
348
349 //////////////////////////////////////////////////
350 // Importation des données du spectre du Fer

```

```

351 //filename_Fe = "I_acier02.dat";
352 //data_Fe = fscanfMat(filename_Fe);
353 //data_Fe = data_Fe(16:$,:);
354 //
355 //nb_Fe = data_Fe(:,1);
356 //lambda_Fe = data_Fe(:,2);
357 //I_Fe = data_Fe(:,3);
358 //
359 //lambda_Fe=lambda_Fe/10;
360 //
361 //plot2d(lambda_Fe,I_Fe,style=[6])
362 ////////////// FIN FER
363 //////////////
364
365
366 //////////////
367 // ANALYSE//
368 //////////////
369 //normalisation du spectre
370 //dans ce TP nous ne faisons pas de mesure absolue du coefficient de
371 //r flexion optique mais nous tudions la d pendence qualitative
372 //de la r fl ctivit en fonction de la longueur d'onde
373 //////////////
374 Iref(abs(Iref) < 1e-3 ) = 0.1;
375 ////
376 ////////////// R fl ctivit Cu
377 //RCu = I_Cu ./ Iref;
378 ////
379 ////////////// R fl ctivit Laiton
380 //Rlaiton = I_laiton ./ Iref;
381 ////
382 ////////////// R fl ctivit Au
383 //RAu = I_Au ./ Iref;
384 ////
385 ////////////// R fl ctivit Fe
386 //RFe = I_Fe ./ Iref;
387 ////
388 /////// Ce terme R est donc proportionnel un facteur g om trique pr s
389 /////// du coefficient de r flexion optique du mat riau tudi .
390 /////// Reflectivity between 450 and 800nm
391 ////
392 ////
393 ////////////// AFFICHAGE R fl ctivit Cu
394 //index = (lambda_Cu >= 450) & (lambda_Cu <= 800);
395 //lambda_Cu_ROI = lambda_Cu(index);
396 //RCu_ROI = RCu(index);
397 //figure;
398 //plot2d(lambda_Cu_ROI,RCu_ROI, style=[5]);
399 //a = gca()
400 //a.data_bounds = [min(lambda_Cu_ROI), -0.5; max(lambda_Cu_ROI), 3];
401
402 ////////////// AFFICHAGE R fl ctivit Laiton
403 //index = (lambda_laiton >= 450) & (lambda_laiton <= 800);
404 //lambda_laiton_ROI = lambda_laiton(index);
405 //Rlaiton_ROI = Rlaiton(index);
406 //figure;
407 //plot2d(lambda_laiton_ROI,Rlaiton_ROI, style=[2]);
408 //a = gca()
409 //a.data_bounds = [min(lambda_laiton_ROI), -0.5; max(lambda_laiton_ROI), 2];
410
411 ////////////// AFFICHAGE R fl ctivit Au
412 //index = (lambda_Au >= 450) & (lambda_Au <= 800);
413 //lambda_Au_ROI = lambda_Au(index);
414 //RAu_ROI = RAu(index);
415 //figure;
416 //plot2d(lambda_Au_ROI,RAu_ROI, style=[6]);
417 //a = gca()
418 //a.data_bounds = [min(lambda_Au_ROI), -0.5; max(lambda_Au_ROI), 3];
419
420 ////////////// AFFICHAGE R fl ctivit Fe
421 //index = (lambda_Fe >= 450) & (lambda_Fe <= 800);
422 //lambda_Fe_ROI = lambda_Fe(index);
423 //RFe_ROI = RFe(index);
424 //figure;
425 //plot2d(lambda_Fe_ROI,RFe_ROI, style=[6]);
426 //a = gca()

```



```

427 //a.data_bounds = [min(lambda_Fe_ROI), -0.5; max(lambda_Fe_ROI), 3];
428 //
429 xlabel("$\lambda$ nm")
430 ylabel("Reflectivity, a.u.")

432 # Simulation avec des valeurs typiques pour l'acier
433
434 # Param tres typiques pour l'acier - Ces valeurs sont des estimations et doivent tre ajust es selon des
    donn es sp cifiques
435 epsilon_inf_typique = 1 # Permittivit haute fr quence typique pour les m taux
436 omega_p_typique = 1.0e16 # Fr quence plasma estim e pour l'acier (en rad/s)
437 tau_typique = 1.0e-14 # Temps de relaxation estim pour l'acier (en s)
438
439 # D finition de la permittivit complexe selon le mod le de Drude
440 def epsilon_typique(omega, epsilon_inf, omega_p, tau):
441     return epsilon_inf - (omega_p**2 / (omega**2 + 1j*omega/tau))
442
443 # Calcul de la r flectivit partir de la permittivit
444 def reflectivity_typique(omega, epsilon_inf, omega_p, tau):
445     eps = epsilon_typique(omega, epsilon_inf, omega_p, tau)
446     return np.abs((np.sqrt(eps) - 1) / (np.sqrt(eps) + 1))**2
447
448 # Gamme de fr quences (en rad/s) pour le calcul de la r flectivit
449 omega_typique = np.linspace(1.0e14, 3.0e16, 1000)
450
451 # Calcul de la r flectivit pour la gamme de fr quences
452 R_typique = reflectivity_typique(omega_typique, epsilon_inf_typique, omega_p_typique, tau_typique)
453
454 # Trac du graphique de la r flectivit
455 plt.figure(figsize=(10, 6))
456 plt.plot(omega_typique / 1e12, R_typique, label='R flectivit th orique (acier)')
457 plt.title('R flectivit optique de l'acier selon le mod le de Drude')
458 plt.xlabel('Fr quence (T rad/s)')
459 plt.ylabel('R flectivit ')
460 plt.legend()
461 plt.grid(True)
462 plt.show()

```