



Filière : SMP -- Semestre : VI

Module : Physique des Matériaux II

Chapitre 6 : Propriétés Optiques des Matériaux

Pr Khechoubi El Mostafa

khechoubi@umi.ac.ma

Année universitaire 2024/2025



INTRODUCTION

Chapitre1 : Rappel Théorie des bandes – Propriétés des Semi-conducteur

Chapitre2 : Application – Physique des Semi-conducteurs

Chapitre3 : Vibration des Phonons

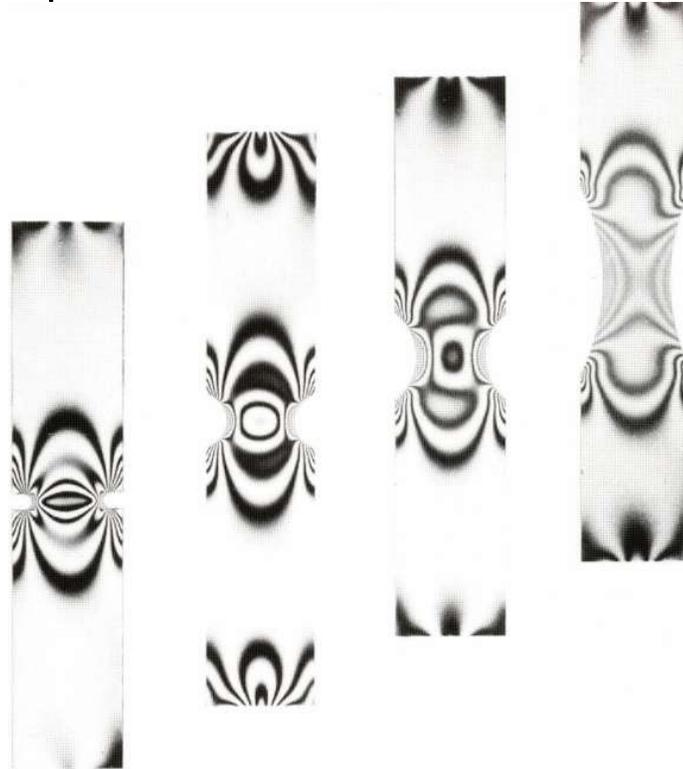
Chapitre4 : Défauts dans les cristaux

Chapitre5 : Propriétés électriques, magnétiques, supraconductivité

Chapitre6 : Propriétés optiques des matériaux

Les quatre tiges transparentes et entaillées qui sont présentées dans cette photographie illustrent le phénomène de la photoélasticité.

Lorsqu'une éprouvette photoélastique subit une déformation élastique.



Ses propriétés optiques (tel l'indice de réfraction) deviennent anisotropes.

Il est possible de déduire la répartition des contraintes dans l'éprouvette à partir des franges d'interférence produites à l'aide d'un système optique spécial et d'une lumière polarisée.

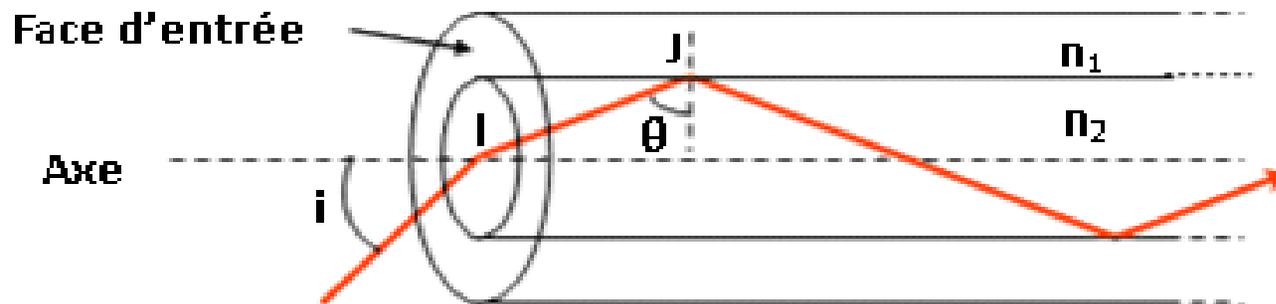
Les franges d'interférence des quatre éprouvettes photoélastiques qu'illustre la photographie révèlent la façon dont la concentration et la répartition d'une contrainte de traction axiale se modifient selon la géométrie de l'entaille.

Pourquoi étudier les propriétés optiques des matériaux?

Lorsqu'un matériau est exposé à un rayonnement électromagnétique, il faut parfois en prévoir et en modifier le comportement.

C'est pourquoi il est nécessaire de bien connaître ses propriétés optiques et de comprendre les mécanismes qui régissent son comportement optique.

A titre d'exemple le rendement des fibres optiques s'améliore lorsqu'une variation progressive de l'indice de réfraction (c'est-à-dire un gradient d'indice) est apportée à la surface extérieure des fibres. Cette variation s'obtient par ajout d'impuretés spécifiques en concentrations précises



Ouverture numérique « **ON** » de la fibre la quantité : $\text{ON} = \sqrt{n_2^2 - n_1^2}$



L'expression « *propriété optique* » renvoie au comportement que manifeste un matériau après avoir été exposé à un rayonnement électromagnétique, notamment à la lumière visible.

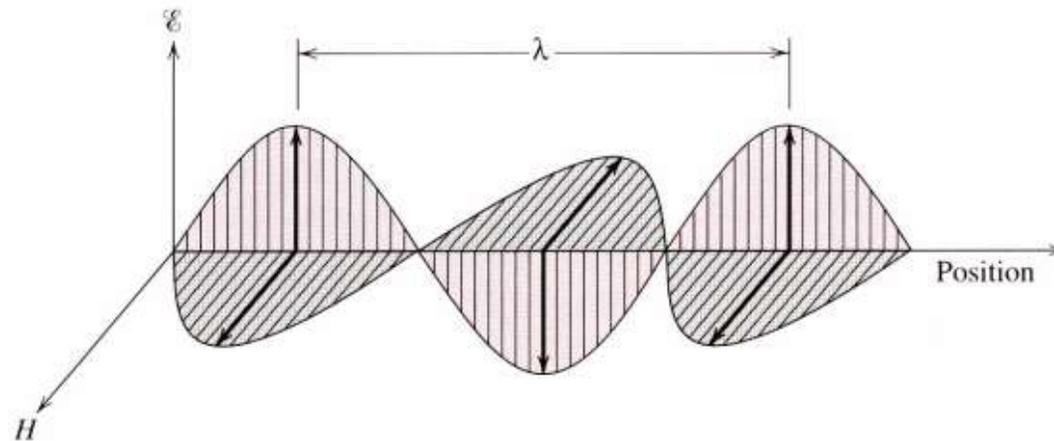
Concepts et principes fondamentaux concernant la nature du rayonnement électromagnétique : Incidences possibles sur les matériaux solides

Comportement optique de matériaux métalliques et de matériaux non métalliques, comportement lié à leur capacité d'absorption, de réflexion et de transmission.

Accent sur la luminescence, la photoconductivité et l'amplification de lumière par émission stimulée de radiations (laser), de même que sur les applications de ces propriétés optiques et l'utilisation des fibres optiques dans le domaine des communications.

Rayonnement électromagnétique

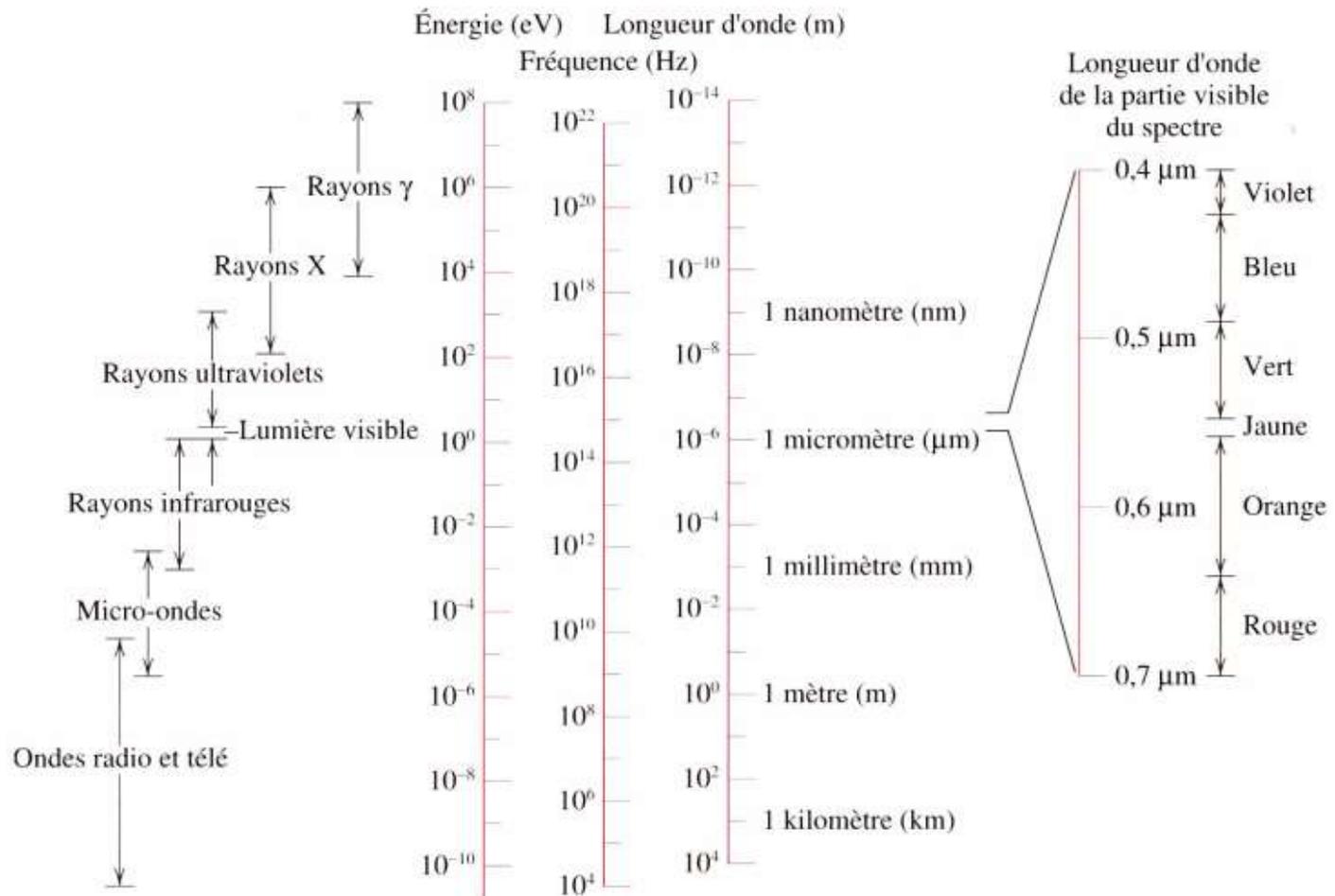
Dans la perspective de la mécanique classique, le rayonnement électromagnétique est décrit comme une onde associée à un champ électrique et à un champ magnétique qui sont perpendiculaires l'un par rapport à l'autre ainsi que par rapport à la direction de propagation de l'onde.



La lumière, la chaleur (ou l'énergie radiante), les ondes radars, les ondes radio et les rayons X constituent autant de formes de rayonnement électromagnétique

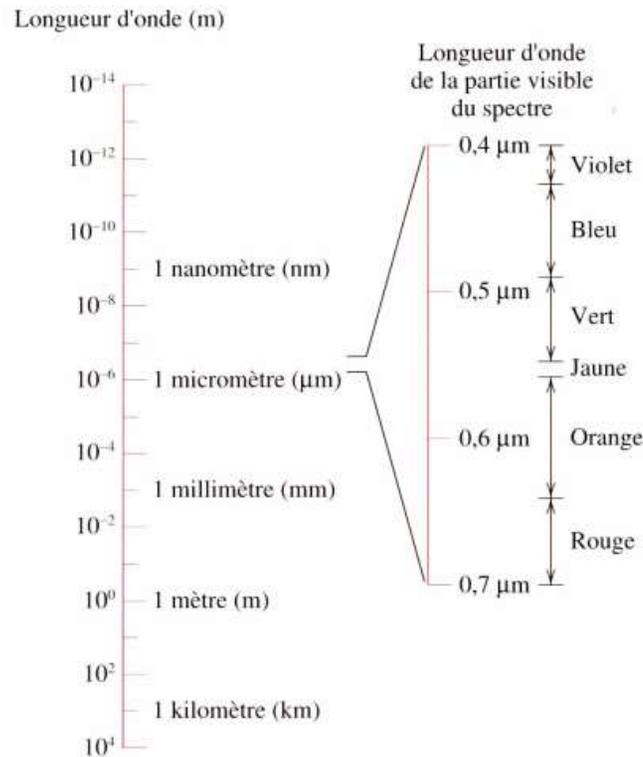
Chaque forme se distingue par une plage de longueurs d'onde qui lui est propre et par la technique utilisée pour la produire.

Le spectre électromagnétique du rayonnement s'étend des rayons γ (émis par des matériaux radioactifs), dont la longueur d'onde est de l'ordre de 10^{-12}m , aux ondes radio, dont la longueur d'onde peut atteindre 10^5m , en passant par les rayons X , le rayonnement ultraviolet, la lumière visible et le rayonnement infrarouge.



Avec des longueurs d'onde qui se situent entre $0,4 \mu\text{m}$ et $0,7 \mu\text{m}$ environ, la « *lumière visible* » occupe une bande très étroite du spectre. C'est la longueur d'onde qui détermine la couleur perçue.

La lumière blanche consiste tout simplement en une combinaison de toutes les couleurs.



Dans la suite nous traiterons essentiellement du rayonnement visible, qui constitue, par définition, le seul auquel l'œil humain est sensible.

Tout rayonnement électromagnétique se déplace dans le vide à la même vitesse, soit celle de la lumière (3×10^8 m/s). Cette vitesse, c , est liée à la permittivité électrique et à la perméabilité magnétique du vide selon l'équation

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

Il est parfois plus pratique d'envisager le rayonnement électromagnétique dans la perspective qu'offre la mécanique quantique

Plutôt que d'être constitué d'ondes, il se compose de grappes ou de paquets d'énergie appelés photons

L'énergie E d'un photon est dite « discrète », c'est-à-dire qu'elle ne peut prendre que certaines valeurs précises selon l'équation suivante

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Interactions de la lumière avec des solides

Lorsque la lumière passe d'un milieu à un autre (de l'air à un solide, par exemple), il se produit plusieurs phénomènes

Transmission dans le nouveau milieu

Absorption par le milieu

Réflexion à l'interface des deux milieux

$$I_0 = I_T + I_A + I_R$$

On peut aussi définir trois autres paramètres : Transmittance (T), Absorbance (A) et Réflectance (R)

$$T = \frac{I_T}{I_0}$$

$$A = \frac{I_A}{I_0}$$

$$R = \frac{I_R}{I_0}$$

$$T + A + R = 1$$



Les matériaux qui transmettent la lumière avec relativement peu d'absorption et de réflexion sont dits « *transparents* »

Les matériaux dits « *translucides* » sont ceux qui transmettent la lumière de façon diffuse, c'est-à-dire que celle-ci se disperse à l'intérieur du matériau de façon telle qu'il n'est pas possible de voir nettement un objet situé derrière ce matériau

Les matériaux qui ne transmettent aucune lumière visible sont dits « *opaques* ». Les métaux bruts sont opaques dans l'ensemble du spectre de la lumière visible, car ils absorbent ou réfléchissent tout rayonnement lumineux qui leur parvient

Par ailleurs, les matériaux constituant des isolants électriques peuvent devenir transparents. En outre, certains matériaux semi-conducteurs sont transparents, tandis que d'autres sont opaques.

Interactions atomiques et électroniques

Les phénomènes optiques qui se produisent au sein des matériaux solides résultent d'interactions entre le rayonnement électromagnétique, d'une part, et les atomes, les ions ou les électrons, d'autre part.

La polarisation électronique et les transitions d'énergie électronique dans les atomes comptent parmi les plus importantes de ces interactions.

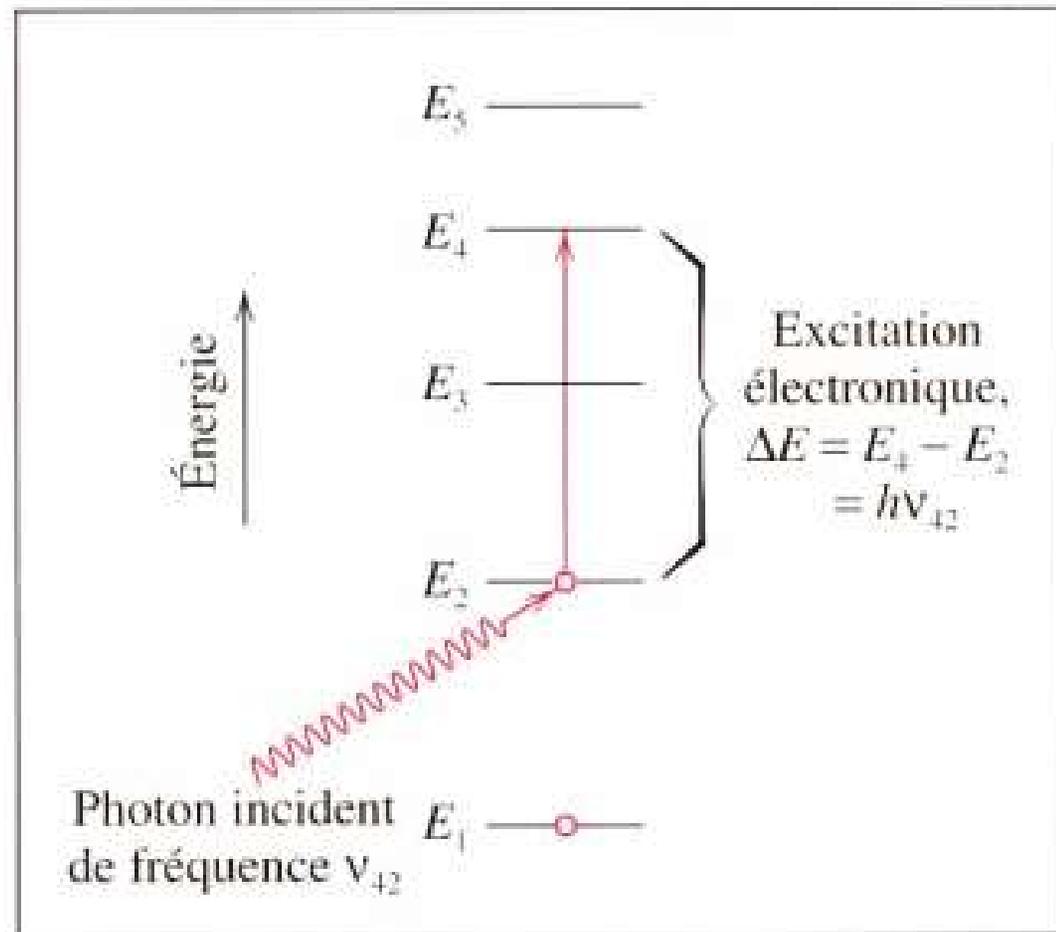
Polarisation électronique

Une onde électromagnétique se compose notamment d'un champ électrique. Lorsque la fréquence du rayonnement se situe dans la partie visible du spectre, ce champ électrique interagit avec le nuage d'électrons entourant chaque atome situé sur sa trajectoire et provoque une polarisation électronique, lors de laquelle le nuage d'électrons se déplace par rapport au noyau de l'atome chaque fois que se modifie l'orientation du champ électrique. Cette polarisation engendre deux effets :

- 1- une partie de l'énergie du rayonnement peut être absorbée
- 2- la vitesse des ondes lumineuses diminue lors de son passage dans le milieu, ce qui correspond au phénomène appelé réfraction

Transitions électroniques

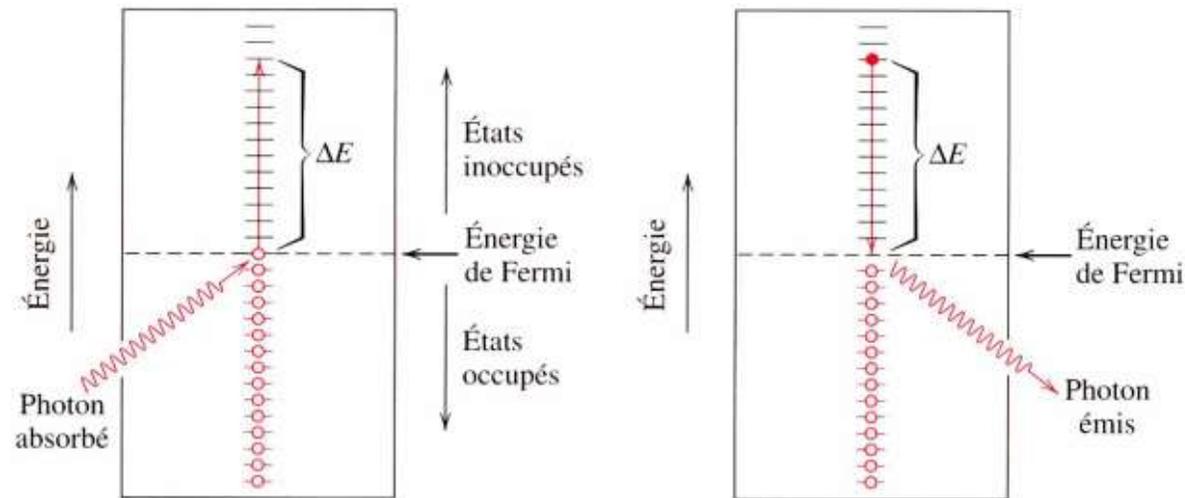
L'absorption et l'émission d'un rayonnement électromagnétique peuvent provoquer des transitions d'électrons les faisant passer d'un niveau d'énergie à un autre.



Un électron qui absorbe un photon d'énergie devient excité et passe d'un état d'énergie occupé, E_2 à un état supérieur inoccupé, E_4 .

Propriétés Optiques des Métaux

Les métaux sont opaques parce que le rayonnement incident dont les fréquences se situent dans la partie visible du spectre excite des électrons et les fait passer à des états d'énergie inoccupés se trouvant au-delà de l'énergie de Fermi.

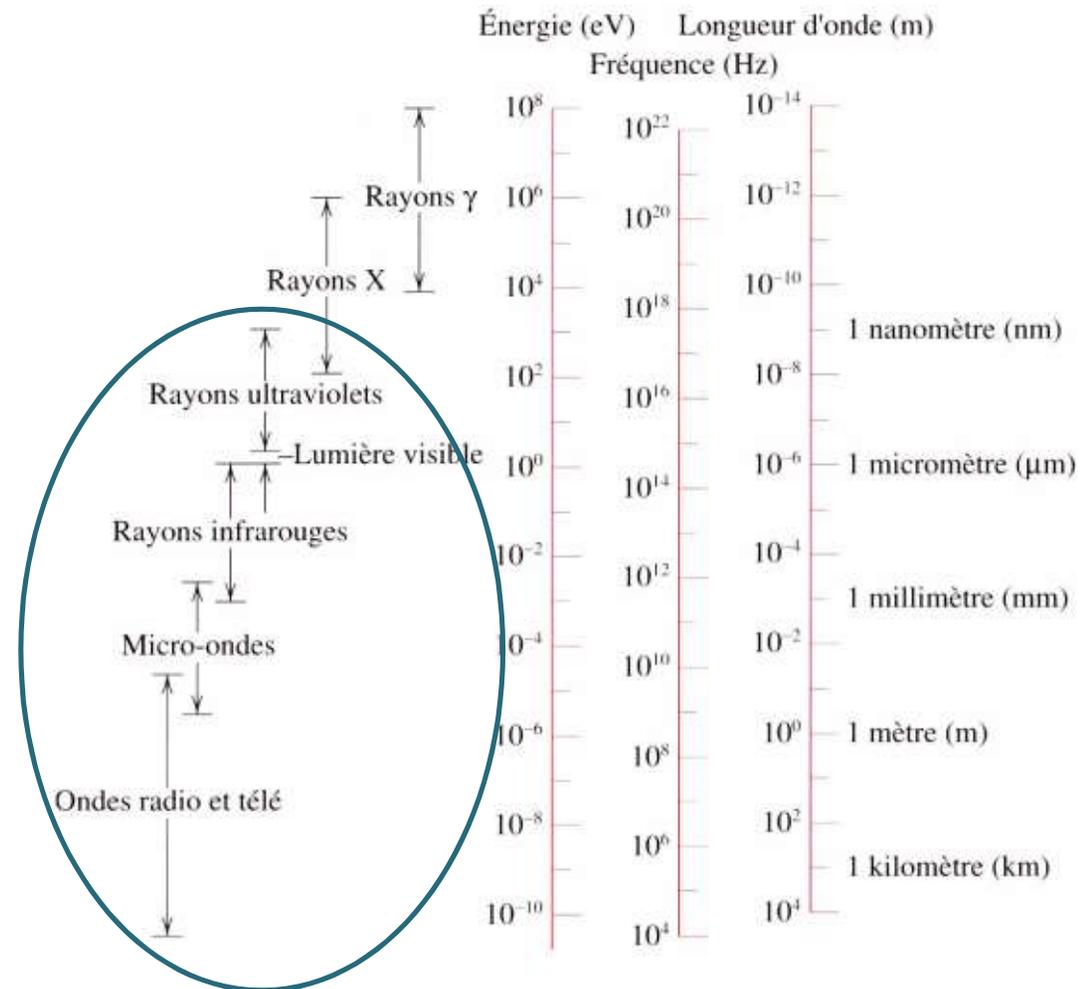


Il s'ensuit alors que le rayonnement incident est absorbé, conformément à l'équation :
$$\Delta E = h\nu.$$

L'absorption totale ne s'effectue que dans une très mince couche extérieure du métal, généralement inférieure à 0,1 mm. C'est pourquoi seule une couche métallique d'une épaisseur inférieure à 0,1 μm est susceptible de transmettre la lumière visible

Toutes les fréquences de la lumière visible sont absorbées par les métaux en raison de la disponibilité constante d'états d'énergie inoccupés permettant des transitions électroniques

Les métaux sont opaques à tout rayonnement électromagnétique dont la fréquence se situe dans la partie inférieure du spectre électromagnétique



Ils sont donc transparents aux seuls rayonnements à haute fréquence (rayons X et γ)



La majeure partie du rayonnement absorbé est réémise à la surface sous forme de lumière visible possédant la même longueur d'onde, qui constitue ainsi la lumière réfléchie.

La réflectance de la plupart des métaux se situe entre **0,90** et **0,95**, car une petite partie de l'énergie issue du retour à l'état fondamental se dissipe sous forme de chaleur

Puisque les métaux sont opaques et fortement réfléchissants, la couleur perçue est déterminée par la répartition des longueurs d'onde du rayonnement réfléchi et non absorbé.

L'aspect argenté brillant que présente un métal exposé à la lumière blanche indique qu'il est fortement réfléchissant pour l'ensemble de la lumière visible. En d'autres termes, les caractéristiques des photons réémis du rayon réfléchi sont approximativement les mêmes, en ce qui concerne leur fréquence et leur nombre, que celles du rayon incident.

L'aluminium et l'argent constituent deux des métaux possédant cette propriété réfléchissante. Pour leur part, le cuivre et l'or paraissent respectivement rouge orangé et jaune parce qu'une partie de l'énergie des photons de lumière de courte longueur d'onde n'est pas réémise sous forme de lumière visible après l'absorption.

Propriétés Optiques des Matériaux non Métalliques

En raison de leur structure électronique en bandes, les matériaux non métalliques peuvent être transparents à la lumière visible. En plus de la réflexion et de l'absorption, les phénomènes de réfraction et de transmission qui s'y produisent seront abordés

Réfraction

La lumière transmise au sein d'un matériau transparent subit un ralentissement et est donc déviée à l'interface de ce matériau et de son milieu d'incidence : il s'agit du phénomène de réfraction. L'indice de réfraction « n » d'un matériau exprime le rapport entre sa vitesse de déplacement dans le vide « c » et sa vitesse de déplacement dans un milieu « v » soit :

$$n = \frac{c}{v}$$

L'ampleur de n (ou le degré de déviation) est fonction de la longueur d'onde de la lumière.

Un tel effet s'observe facilement lors de la dispersion ou de la séparation d'un faisceau de lumière blanche en ses couleurs constitutives par suite de son passage dans un prisme de verre.

Chaque couleur subit une déviation d'une ampleur distincte à sa sortie du prisme et est ainsi séparée des autres couleurs. L'indice de réfraction renvoie non seulement à la trajectoire optique de la lumière, mais aussi, à la proportion de la lumière incidente qui est réfléchiée à la surface

La vitesse de la lumière « v » dans un milieu donné :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}$$

où ϵ et μ sont respectivement la permittivité et la perméabilité propres de ce milieu

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

$$n = \frac{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

$$n = \frac{c}{v}$$

$$n = \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}$$

où ϵ_r et μ_r représentent la constante diélectrique et la perméabilité magnétique relative, respectivement. Puisque la plupart des substances ne sont que légèrement magnétiques

$$\mu_r \cong 1$$

$$n \cong \sqrt{\epsilon_r}$$

Il existe donc, dans le cas des matériaux transparents, une relation entre l'indice de réfraction et la constante diélectrique

La réfraction est liée à la polarisation électronique pour les fréquences relativement élevées de la lumière visible. Il s'ensuit que la composante électronique de la constante diélectrique peut être déterminée à partir des mesures de l'indice de réfraction

Le ralentissement d'un rayonnement électromagnétique dans un milieu résulte de la polarisation électronique, la taille des atomes ou ions constitutifs a une forte incidence sur l'ampleur de cet effet

En général, plus l'atome ou l'ion est de grande taille, plus la polarisation est forte, plus la vitesse est faible et plus l'indice de réfraction est élevé.

L'indice de réfraction d'un verre sodocalcique moyen est d'environ 1,5. L'ajout d'ions de baryum et de plomb de grande taille (BaO et PbO) à un verre fait sensiblement augmenter la valeur de « n ».

L'indice de réfraction d'un verre à haute teneur en plomb, comportant environ 90 % de PbO est d'environ 2,1

En ce qui a trait aux céramiques cristallines dotées d'une structure cubique et aux verres, l'indice de réfraction est indépendant de la direction cristallographique et est donc isotrope.

Quant aux cristaux non cubiques, leur indice de réfraction est anisotrope, c'est-à-dire que sa valeur est plus élevée dans les directions où la densité d'ions est la plus prononcée.

Indices de réfraction de quelques verres, céramiques transparentes et polymères et valeur moyenne dans le cas des céramiques cristallines dont « n » est anisotrope.

Matériau	Indice de réfraction moyen	Matériau	Indice de réfraction moyen
Céramiques		Polymères	
Verre de silice	1,458	Polytétrafluoroéthylène	1,35
Verre borosilicaté (pyrex)	1,47	Polyméthacrylate de méthyle	1,49
Verre sodocalcique	1,51	Polypropylène	1,49
Quartz (SiO_2)	1,55	Polyéthylène	1,51
Verre d'optique flint dense	1,65	Polystyrène	1,60
Spinnelle (MgAl_2O_4)	1,72		
Périclase (MgO)	1,74		
Corindon (Al_2O_3)	1,76		

Réflexion

Lorsqu'un faisceau lumineux passe d'un milieu à un autre dont l'indice de réfraction est différent, une partie de la lumière se disperse à l'interface des deux milieux, même lorsqu'ils sont tous deux transparents.

La réflectance R correspond à la proportion du faisceau incident qui est réfléchi à l'interface : $R = \frac{I_R}{I_0}$

- ✓ Lorsque la lumière est normale à la surface, alors : $R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$
- ✓ Lorsque le faisceau n'est pas perpendiculaire par rapport à l'interface, R varie selon l'angle d'incidence.
- ✓ Si la lumière passe du vide ou de l'air à un solide s , alors : $R = \left(\frac{n_s - 1}{n_s + 1} \right)^2$

Plus l'indice de réfraction d'un solide est élevé, plus sa réflectance est prononcée



*Les pertes de réflexion caractérisant certains instruments optiques
peuvent être minimisées grâce à l'application sur la surface
réfléchissante de très minces couches d'un matériau diélectrique tel
que le fluorure de magnésium (MgF_2)*

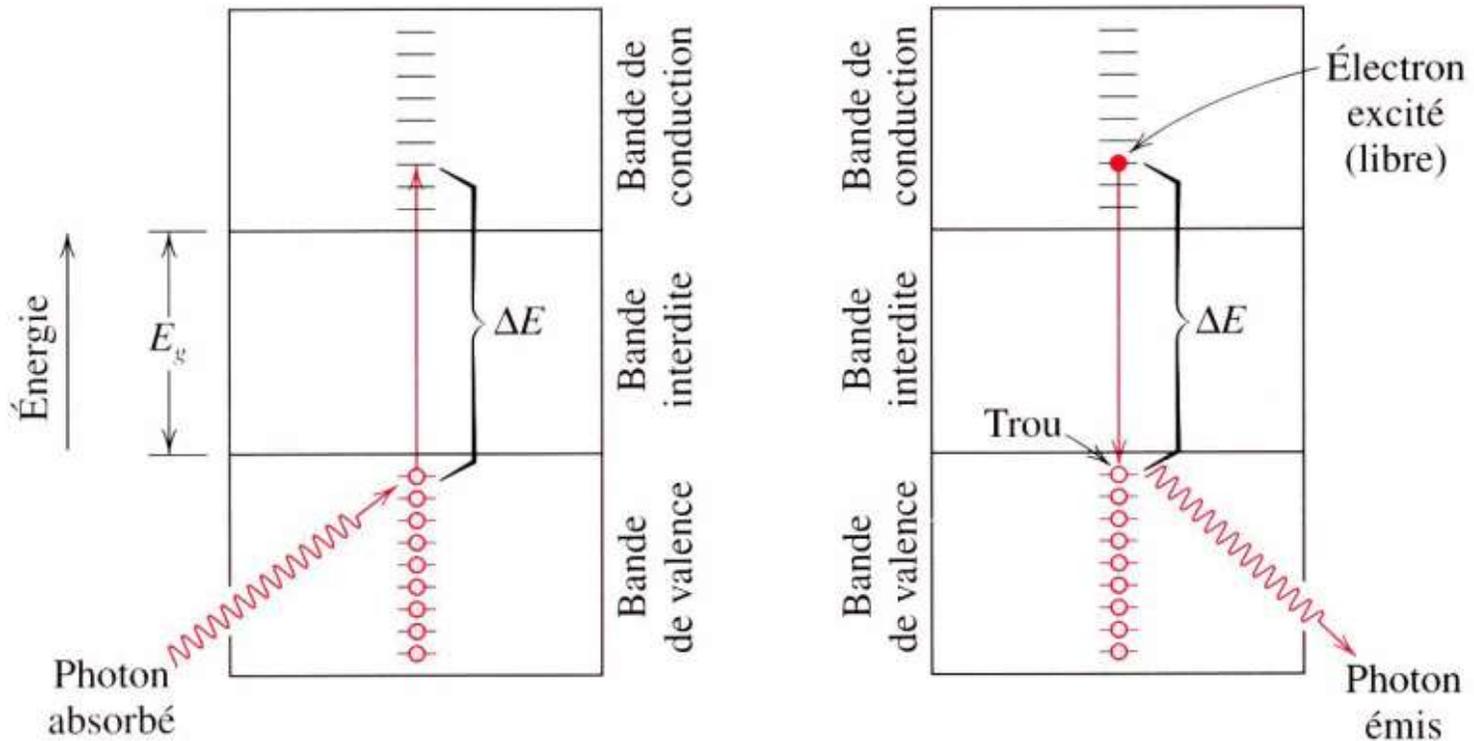
Absorption

Les matériaux non métalliques sont « *opaques* » ou « *transparents* » à la lumière visible et prennent une apparence colorée lorsqu'ils sont transparents.

L'absorption du rayonnement lumineux par ces matériaux est régie par deux mécanismes fondamentaux, qui ont également une incidence sur leurs propriétés relatives à la transmission de la lumière.

- ✓ **Polarisation électronique** : L'absorption attribuable à cette polarisation n'est élevée que lorsque la fréquence de la lumière avoisine la fréquence de relaxation des atomes constitutifs.
- ✓ **Structure de bandes** : Repose sur la transition d'électrons de la bande de valence à la bande de conduction, qui relève de la structure de bandes d'énergie électronique du matériau.

L'absorption d'un photon de lumière amène l'électron ainsi excité à passer de la bande de valence presque remplie à un état inoccupé de la bande de conduction, au-delà de la bande interdite. Elle donne lieu à un électron libre dans la bande de conduction et à un trou dans la bande de valence.



L'excitation d'un électron et l'absorption qui l'accompagne ne sont possibles que si l'énergie du photon est supérieure à l'énergie de la bande interdite, E_g

$$\Delta E = h\nu$$

$$h\nu > E_g$$

$$\frac{hc}{\lambda} > E_g$$

La longueur d'onde minimale de la lumière visible, $\lambda_{min} = 0,4 \mu\text{m}$.

La valeur maximale de l'énergie de la bande interdite, E_{gmax} , à laquelle l'absorption de la lumière visible est possible se calcule ainsi

$$\frac{hc}{\lambda} > E_g$$

$$E_{gmax} = \frac{hc}{\lambda_{min}}$$

$$E_{gmax} = 3,1 \text{ eV}$$

En d'autres termes, les matériaux « *non métalliques* » n'absorbent aucune lumière visible lorsque l'énergie de leur bande interdite a une valeur supérieure à environ **3,1 eV**. Ces matériaux paraissent transparents et incolores lorsqu'ils sont d'une grande pureté

Par ailleurs, la longueur d'onde maximale de la lumière visible, λ_{max} , est d'environ $0,7 \mu m$.

Le calcul de l'énergie minimale de la bande interdite, E_{gmin} , à laquelle la lumière visible est absorbée s'effectue alors de la façon suivante :

$$E_{gmin} = \frac{hc}{\lambda_{max}}$$

$$E_{gmin} = 1,8 eV$$

Un tel résultat signifie que toute la lumière visible est absorbée lors des transitions de la BV à la BC dans les matériaux SC dont $E_g < 1,8 eV$ environ, et que ces matériaux sont donc opaques.

Par contre, seule une partie de la lumière visible est absorbée par les matériaux dont l'énergie $1,8 eV < E_g < 3,1 eV$ et c'est pourquoi ces matériaux paraissent colorés

Si
 $E_g = 1,12 eV$



ZnSe
 $E_g = 2,7 eV$



L'indice de réfraction d'un solide qui varie en fonction de la longueur d'onde du faisceau incident, la réflectance varie aussi selon la longueur d'onde.

L'indice de réfraction d'un solide qui varie en fonction de la longueur d'onde du faisceau incident, la réflectance varie aussi selon la longueur d'onde.

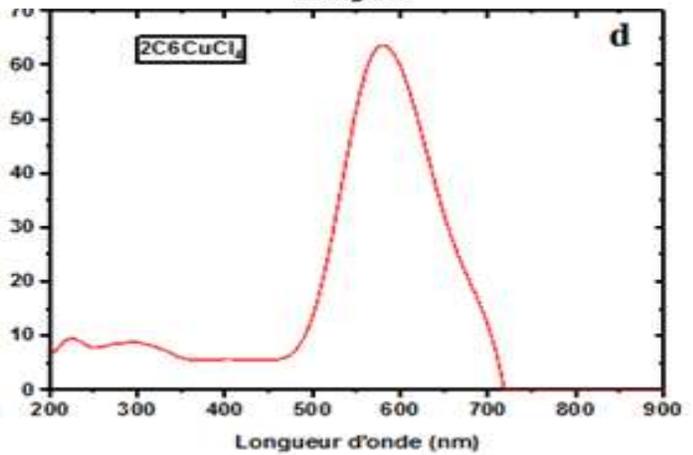
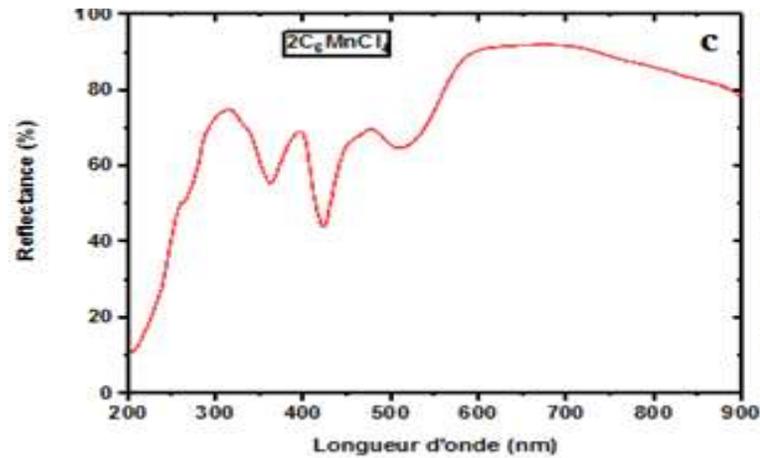
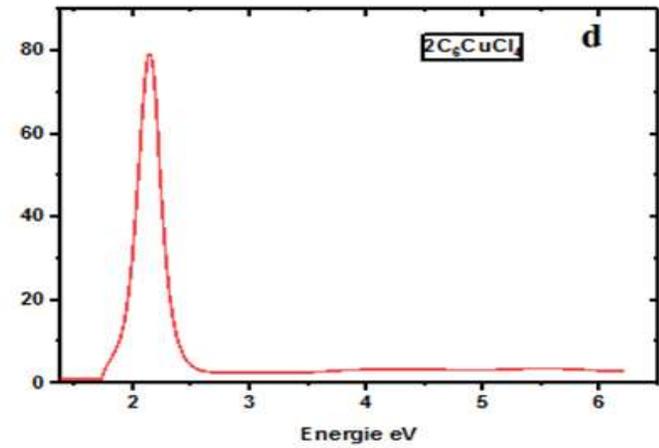
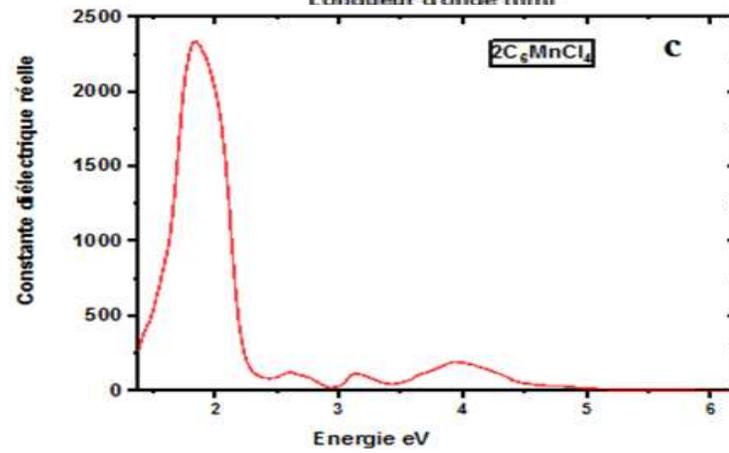
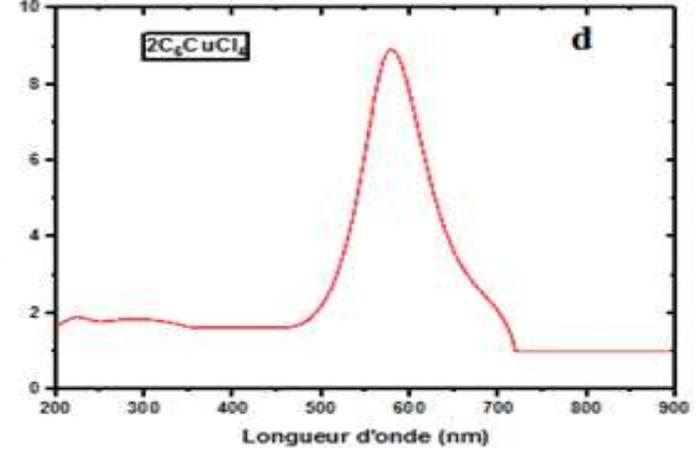
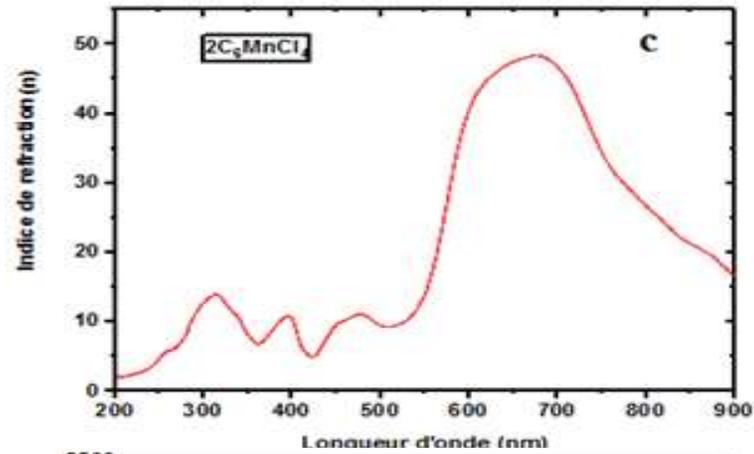
$$R = \frac{(n_s - 1)^2 + k^2}{(n_s + 1)^2 + k^2}$$

n_s et k : Parties réelle et imaginaire de l'indice de réfraction

$$\varepsilon' = n^2 - k^2$$

$$\varepsilon'' = 2nk$$

k est presque négligeable pour ces composés



Énergie de gap optique

Méthode de Kubelka-Munk

$$F(R) = \frac{(1 - R)^2}{2R}$$

