

Matériaux optiques.

Nous allons étudier les propriétés optiques qui concernent beaucoup de matériaux. En général nous pouvons les classer dans les catégories suivantes :

- Isolants et semi-conducteurs cristallins
- Verres
- Métaux
- Matériaux moléculaires
- Isolants et semi-conducteurs dopés

Dans ce chapitre nous donnons une introduction des propriétés principales de ces matériaux. Nous verrons les détails dans les chapitres suivants.

1 Isolants et semi-conducteurs cristallins

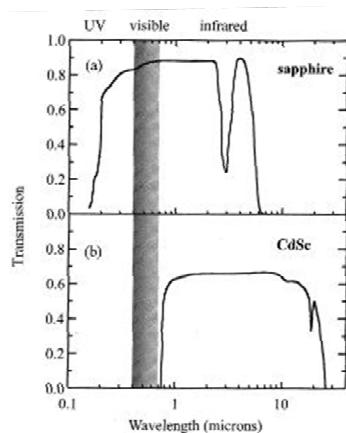


Figure 1. Courbes $T(\lambda)$ pour le saphir (3 mm) et le CdSe (1.67 mm).

Une des courbes typiques utilisées pour caractériser les propriétés optiques est par exemple la courbe où la transmission ou réflexion est illustrée en fonction de la longueur d'onde (ou énergie des photons). Dans la Fig. 1 vous trouverez la transmission $T(\lambda)$ pour le saphir et le CdSe. Dans la figure il est aussi indiqué quels domaines de longueurs d'onde correspondent aux UV, visible et infrarouge.

- Le **saphir** a une très bonne transmission dans le domaine entre 0.2 et 0.6 μm . Ceci définit le domaine de transparence du cristal. Ce domaine inclut le visible, c'est pour cette raison qu'il nous semble transparent (à l'œil humain). Le coefficient d'absorption du saphir dans le domaine de transparence est très petit (κ presque 0). La valeur de n dans ce domaine est presque constante et égal à 1.77.

Exercice : calculez R et T

La fine bande d'absorption à 3 μm et la réduction forte à partir de 6 μm est conséquence de l'absorption par des vibrations atomiques dans le matériau.

Dans le UV l'absorption diminue drastiquement ($\lambda < 0.2 \mu\text{m}$) à cause de l'absorption par les électrons liés.

Le **CdSe** par contre a une transmittance nulle jusqu'à une longueur d'onde de 0.72 μm et puis devient partiellement transparent jusqu'à environ 25 μm . L'absorption pour $\lambda < 0.72 \mu\text{m}$ est due aux transitions excitées par la lumière des électrons liés. La table suivante montre le domaine de transparence et index de réfraction de quelques isolateurs.

Crystal	Common name	Transparency range (μm)	Birefringent	n
Al_2O_3	sapphire	0.2 – 6	yes	1.771 (o), 1.763 (e)
BaF_2		0.2 – 12		1.476
Diamond		0.25 – > 80		2.424
KBr		0.3 – 30		1.564
KCl		0.21 – 25		1.493
KI		0.3 – 40		1.673
MgF_2		0.12 – 8	yes	1.379 (o), 1.390 (e)
NaCl	salt	0.21 – 20		1.55
NaF		0.19 – 15		1.326
SiO_2	quartz	0.2 – 3	yes	1.546 (o), 1.555 (e)
TiO_2	rutile	0.45 – 5	yes	2.652 (o), 2.958 (e)

Table 1.

- De façon générale, les matériaux isolants ont tendance à être transparents et sans couleur dans le domaine du visible et absorbent fortement dans le UV et IR, ce qui n'est pas perçu par l'œil humain.
- Le fait que ces matériaux soient cristallins donne lieu à un certain nombre de propriétés qui sont le résultat de la symétrie du réseau. Un exemple est la **biréfringence**, où la vitesse de propagation de la lumière dépend de la direction par rapport aux axes de symétrie du cristal.
- De façon conceptuelle, les propriétés optiques des matériaux semi-conducteurs se ressemblent avec les isolants. La différence est seulement que l'absorption des excitations électroniques et vibrationnelles se fait pour des longueurs d'onde plus grandes.
- Un aspect assez important des propriétés optiques des semi-conducteurs est qu'une partie entre eux ont une forte luminescence quand les électrons sont excités à des niveaux plus élevés. Celle-ci est la base des dispositifs comme par exemple des diodes luminescentes, lasers...

2 Verres

Les verres sont des matériaux optiques extrêmement importants. Ils ont été utilisés pendant des siècles en forme de lentilles, prismes, fenêtres... Très récemment ils ont trouvé une application tout-a-fait différente pour la transmission de signaux par fibre optique.

Avec l'exception des verres colorés, ils sont transparents dans le visible. Ils ne sont pas cristallins, donc ils n'exhibent pas de problèmes d'anisotropie.

La grande majorité de verres est obtenue en fondant du sable (silice, SiO_2) avec d'autres éléments. La silice pure fondue (pure fused silica) est un isolant et comme tel elle a toutes les caractéristiques mentionnées dans la section précédente. La transparence est ainsi entre 0.2 et 2 μm .

L'addition d'autres éléments chimiques pendant l'étape de fonte de la silice donne comme résultat une ample palette de verres. La présence de ces additifs peut changer l'index de réfraction et transmission. Le tableau suivant montre une liste de la composition des verres courants et les valeurs de n et transmission dans l'UV. Il est clair que les additifs changent n avec l'inconvénient de changer la transmission dans le UV. Une valeur élevée de n est désirée dans des produits de verre pour la valeur élevée de n augmente l'apparence brillante à cause d'une valeur plus grande de R.

Les verres colorés seront discutés plus tard.

Name	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	BaO	PbO	P ₂ O ₅	n	T
Fused silica	100									1.460	0.91
Crown (K)	74			9	11	6				1.513	0.4
Borosilicate crown (BK)	70	10		8	8	1	3			1.519	0.35
Phosphate crown (PK)		3	10		12	5			70	1.527	0.46
Light flint (LF)	53			5	8			34		1.585	0.008
Flint (F)	47			2	7			44		1.607	–
Dense flint (SF)	33				5			62		1.746	–

Tableau 2. Caractéristiques des verres les plus communs.

3 Métaux

La caractéristique optique des métaux est qu'ils sont brillants. C'est pour cette raison que des métaux comme l'aluminium et l'argent ont été utilisés pour faire des miroirs pendant des siècles. L'apparence brillante est une conséquence de leur coefficient de réflectivité élevée qui est lié avec l'interaction de la lumière avec les électrons libres du métal.

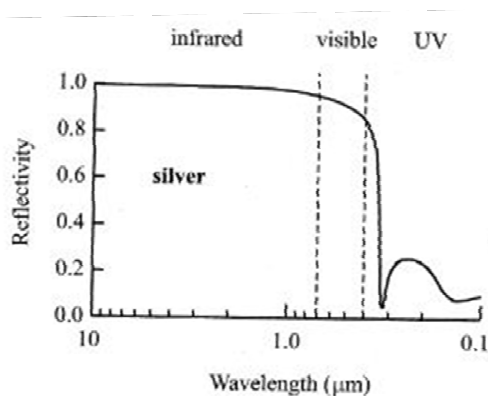


Figure 1. Réflectivité de l'argent

La figure ci-dessus montre la réflectivité de l'argent en fonction de la longueur d'onde dès l'IR à l'UV. Dans l'IR, R est presque 100% et reste au-dessus du 80% pour le domaine visible. Elle diminue fortement dans l'UV. Ceci est un comportement général pour les métaux.

La fréquence au-dessus de la quelle R diminue fortement est dénommée fréquence de plasma. Elle a avoir avec la fréquence propre d'oscillation des électrons. Nous verrons plus loin particulièrement à quoi ceci correspond.

Certains métaux ont des couleurs (ex. cuivre, or...). Les couleurs sont le résultat de transitions électroniques qui sont possibles dans les matériaux. Ceci sera exploré plus en détail dans les prochains chapitres.

4 Matériaux moléculaires

On comprend par matériau moléculaire des solides formes par des molécules organiques. Les composés organiques peuvent former des solides dans l'état cristallin mais aussi amorphe. Dans les solides, les molécules 'tiennent ensemble' grâce aux forces de Van der Waals qui s'exercent. Dans les molécules mêmes, les atomes sont liés par des liaisons covalentes.

À cause de la faible liaison entre les molécules, les propriétés optiques des solides moléculaires ressemblent fortement à celles des molécules isolées. Les composés organiques peuvent être classifiés généralement en systèmes saturés ou conjugués. Cette classification dépend du type de liaison à l'intérieur de la molécule. Nous verrons ceci plus en détail dans un chapitre futur.

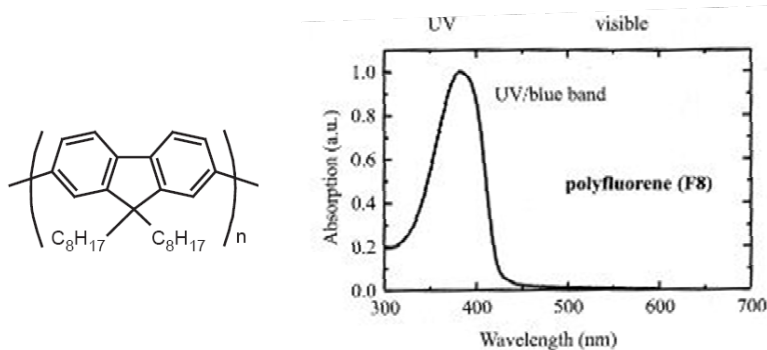


Figure 2. Structure et spectre d'absorption du polymère F8 basé en polyfluorène.

Cette figure montre l'absorption du polymère polyfluorène (F8). Ce polymère est transparent le long du visible et absorbe fortement dans l'UV, ce qui est dû à des excitations vibrationnelles et électroniques.

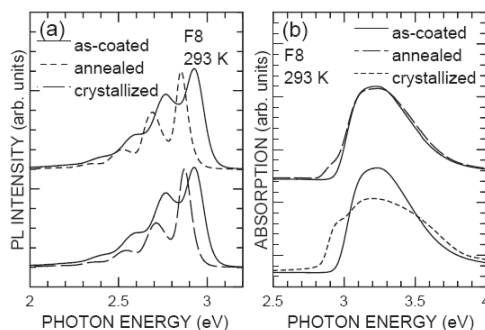


Fig. 2. (a) PL and (b) optical absorption spectra of F8 thin films.

Figure 3. a) luminescence et absorption optique de couches minces de F8.

Une caractéristique intéressante de ce polymère est dans le visible. En changeant un peu la structure des unités qui forment le polymère il est possible de changer la couleur de la luminescence. Ce genre de matériaux a aussi des applications dans le domaine des diodes lumineuses.

5 Verres dopés.

La couleur d'un verre peut être changée de plusieurs façons :

- 1) En variant la nature et composition du matériau dopant, par exemple avec du $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Se}$
- 2) Si la taille des nanocristaux dispersés dans le verre est très petite, ceci peut avoir un grand effet dans la couleur. En effet, lorsque les dimensions du matériau atteignent la taille de la longueur d'onde de l'électron ou plus petite, des phénomènes de confinement quantique ont lieu. Ceci change la longueur d'onde dans laquelle les matériaux émettent.

3) En dopant le matériau avec des atomes optiquement actifs. Par exemple le Rubis est un oxyde d'aluminium dopé avec 0.05% de Cr^{3+} .

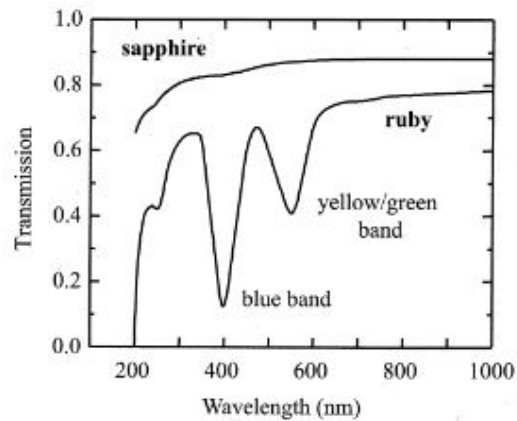


Figure 4. Spectre de transmission d'un Rubis synthétique avec alumine (Al_2O_3) pure. L'épaisseur des deux cristaux est respectivement de 6.1 et 3 mm.

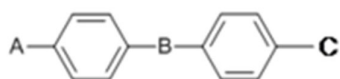
Dans la figure on compare le spectre de transmission d'un Rubis synthétique avec celui de l'oxyde d'aluminium. La présence d'ions de Cr produit l'apparition de deux bandes d'absorption dans le visible : bleu et vert/jaune. C'est pour cette raison que les rubis sont rouges.

6 Exemple technologique : cristaux liquides pour les applications d'écran plat (LCDs)

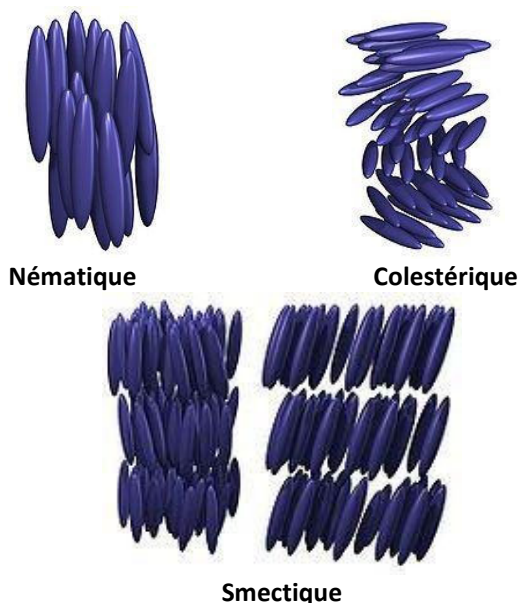
Actuellement nous sommes tous familiers avec les écrans plats à LCD. Cette technologie est basée sur les propriétés optiques des cristaux liquides (CL). Nous allons voir ce que sont les CL, leurs propriétés et puis comment ces dernières peuvent être utilisées pour les LCDs.

- **Cristaux liquides.**

Un cristal liquide est un état de la matière qui combine des propriétés d'un liquide conventionnel et celles d'un solide cristallin. En général il s'agit de molécules allongées à base de carbone avec quelques additifs comme le N, F etc. On étudie en général les CL thermotropiques, dont l'ordre dépend de la température à laquelle ils se trouvent.



A : groupe orienteur (cyano, nitro, méthyle, halogène...)
B : groupe pontant (souvent linéaire) (alcène, ester...)
C : alcane polyéthers C_nH_{2n+1} ou per-fluorés C_nF_{2n+1}



Les CL peuvent être classifiés en fonction de leur degré d'ordre, comme le montre la figure ici à gauche.

La phase **nématique** est la moins ordonnée. À cause de la forme allongée des molécules, elles s'organisent de façon à être parallèles entre elles (comme des allumettes dans une boîte).

La phase **colestérique** est parfois appelée 'nématique chirale'. Les molécules sont alignées de façon parallèle entre elles mais en faisant une sorte de spirale (voir figure à gauche).

La phase smectique consiste en une structure organisée en couches.

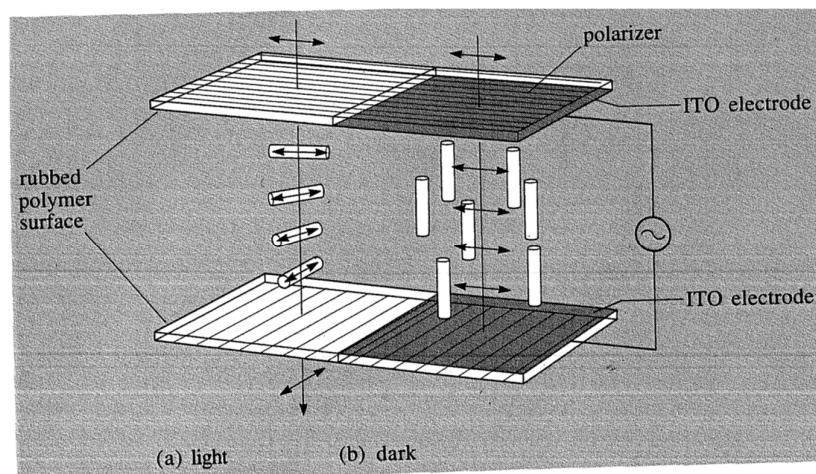
- **Éléments qui déterminent les propriétés élastiques et optiques des CL**

Vue la morphologie des molécules de CL, on espère qu'ils ont des propriétés élastiques. Cela veut dire, qu'ils peuvent être déformés et qu'ils reviendront sur la structure originale lorsque la déformation est arrêtée. Il y a trois types de déformation : déploiement, twist et flexion. Comme on le verra plus tard, cette capacité de déformation sera très utile pour l'application en écrans liquides.

Les propriétés optiques sont déterminées principalement par leur morphologie unidimensionnelle et le fait que dans leur composition il y a des éléments très électronégatifs qui ont tendance à retenir les électrons tout en formant liaison covalente. Cela veut dire que la charge dans la molécule est répartie de façon non-uniforme. Il y a donc un champ électrique interne que l'on représente avec la magnitude du dipôle (charge x longueur). Ce champ électrique interne donne lieu à une interaction avec la lumière très particulière.

- **Le dispositif avec des nématiques twistes.**

La figure ci-dessous montre le principe de fonctionnement d'un pixel dans un écran à CL. Sur la partie intérieure des électrodes on dépose une couche mince de polymère transparent (normalement polyamide). On le peigne pour induire des creux allongés (normalement un rouleau de coton). Après on dépose les CL, qui s'alignent selon les creux. Les creux des deux électrodes sont disposés de façon perpendiculaire. Ceci permet l'orientation des CL.



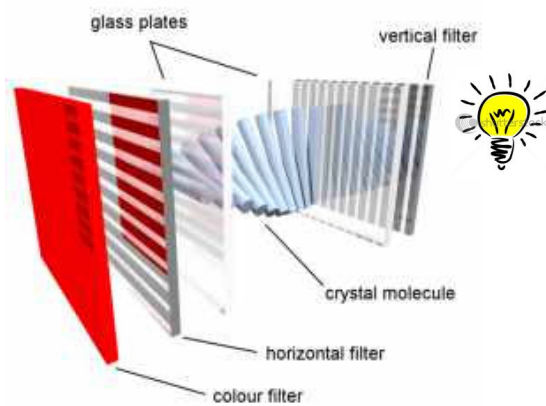
Dans cette configuration, lorsque la lumière arrive avec une polarisation¹ parallèle à l'orientation des molécules sur la surface du pixel, elle est transmise. Lors de la propagation de la lumière à travers le CL, la polarisation de la lumière tourne en suivant l'orientation des molécules de CL (grâce au dipôle électrique). La lumière transmise aura une polarisation perpendiculaire à celle en entrée.

NOTE : Dans le cas où il y aurait un polarisateur à l'entrée, la lumière incidente ayant une polarisation perpendiculaire à l'orientation des molécules à l'entrée, elle ne serait pas transmise.

Lorsqu'on applique une tension entre les deux électrodes, grâce au dipôle des CL, les molécules s'alignent de façon perpendiculaire aux surfaces. À ce moment-là, la polarisation de la lumière ne tourne plus et donc la lumière n'est pas transmise. C'est comme ça que l'on transforme un pixel 'transparent' en noir.

¹ La polarisation de la lumière fait référence à l'orientation du champ électrique de l'onde électromagnétique.

- **Composition des écrans LCD**



La figure ici à gauche montre la structure générale d'un écran LCD. Il s'agit d'un écran type actif.

Tout derrière il y a une lampe qui émet de la lumière blanche. Après il y a un polariseur qui laisse passer seulement la lumière qui a une polarisation parallèle au polariseur. Celui-ci est aligné avec l'axe des CL en entrée. Les CL tournent et à la sortie il y a un nouveau polariseur qui laisse sortir seulement la lumière polarisée parallèle à l'axe des CL. Après il y a un filtre qui transmet un certain couleur. Chaque pixel a trois unités avec trois couleurs : rouge, bleu et vert.

Ci-dessous nous trouvons la structure de l'écran du point de vue électrique. Les lignes horizontales et verticales correspondent aux électrodes d'adressage. Une tension est envoyée périodiquement sur les lignes et colonnes pour distribuer l'information déterminant quel pixel doit être allumé ou non.

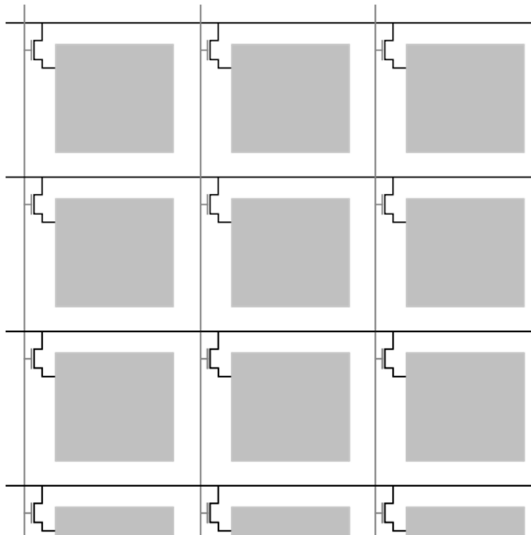
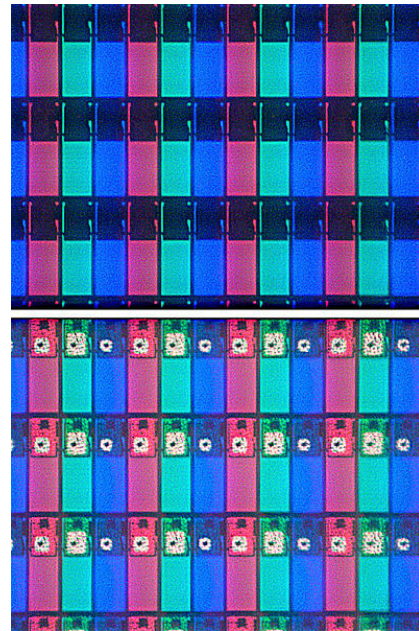


Schéma électrique d'un écran LCD. Les dispositifs sur le coin sont des transistors connectés à un condensateur (forme par les deux électrodes et le CL).



En effet lorsqu'il y a une tension positive au croisement d'une ligne et une colonne, le courant passe au travers du transistor et charge un condensateur qui maintient la tension entre les électrodes du pixel. Cela rend le pixel noir.

La figure ci-dessus à droite montre en détail un écran LCD à couleurs. Nous voyons sur la partie haute des pixels les transistors.

Dans certains cas, nous trouvons des LCDs qui fonctionnent sans lampe. Ce genre de LCD fonctionne en réflexion (de la lumière ambiante).

Écrans LCD **actifs** et **passifs**. La différence entre les écrans actifs et passifs provient du fait que les premiers ont besoin d'une tension en permanence pour être actifs, alors que pour les passifs les CL restent piégés dans la configuration sans avoir besoin de tension. Les écrans passifs sont utilisés surtout dans le domaine de l'e-book et consomment donc beaucoup moins d'énergie.