

1 Cristaux liquides

L'essentiel en trois phrases

- Habituellement, un corps pur solide devient liquide lorsque sa température dépasse la température de fusion. À contrario, un cristal liquide passe par une ou plusieurs **phases** intermédiaires, avant de rejoindre la phase liquide.
- Les cristaux liquides sont le plus souvent constitués de molécules organiques **allongées**.
- Ces molécules **s'orientent** le long de la direction du champ électrique appliqué. Cette propriété est utilisée, par exemple, dans les systèmes d'affichages à cristaux liquides.

1.1 Un état particulier de la matière

Pour certains corps purs, on peut mettre en évidence des états particuliers, présentant les caractéristiques *macroscopiques* d'un **liquide** (par exemple l'écoulement) et les caractéristiques *microscopiques* d'un **solide**, à savoir le fort niveau d'organisation des molécules entre elles. Cet état particulier, appelé *cristal liquide* par son découvreur Otto LEHMAN en 1888, se rencontre souvent pour des espèces chimiques ayant une forme allongée avec une partie rigide (souvent assurée par la présence de cycles) et une partie flexible (sous forme de longue chaîne carbonée). Ci-dessous, la formule du benzoate de cholestéryle, un cristal liquide (on trouve également cet ester du cholestérol et de l'acide benzoïque dans les couleurs pour les cheveux, le maquillage et autres produits cosmétiques).

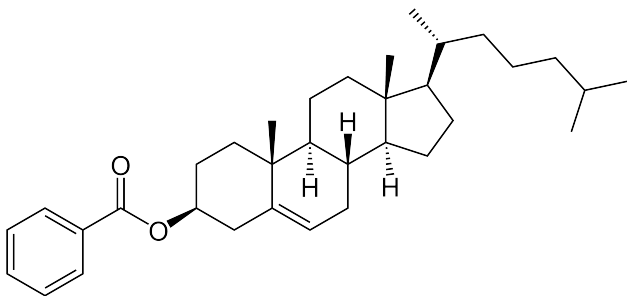


FIG. 1 – Le benzoate de cholestéryle, un cristal liquide.

Les cristaux liquides possèdent certaines propriétés optiques d'un solide, par exemple la diffusion de la lumière ou encore la biréfringence (l'indice $n = \frac{c}{v}$ dépend de la polarisation de la lumière, voir plus loin).

Il existe une grande diversité de niveaux d'organisation de telles molécules. Citons les cristaux liquides de types ou en phases :

- smectique ;
- nématique ;
- cholestérique.

Ces trois phases en particulier (et leurs applications) sont détaillées ultérieurement. L'organisation des molécules, et donc l'**état** de cristal liquide, peut être *contrôlée*, par exemple par la température ou encore par la présence

d'un champ électrique. Cette dernière particularité est exploitée dans les dispositifs d'affichage de notre vie quotidienne.

C'est en 1970 qu'un français, Pierre-Gilles DE GENNES, établissait ce domaine comme un nouveau domaine de la physique, ce qui lui valut le prix Nobel en 1991.

1.2 La polarisation de la lumière

La lumière « naturelle » (*non polarisée*) peut être décrite comme une onde qui vibre dans **toutes les directions**, perpendiculairement à sa direction de propagation (appel : la lumière est donc une onde *transversale*).

À contrario, une lumière *polarisée* ne vibre que dans **une seule direction** (toujours perpendiculaire à la direction de propagation, le caractère transversal de l'onde est conservé).

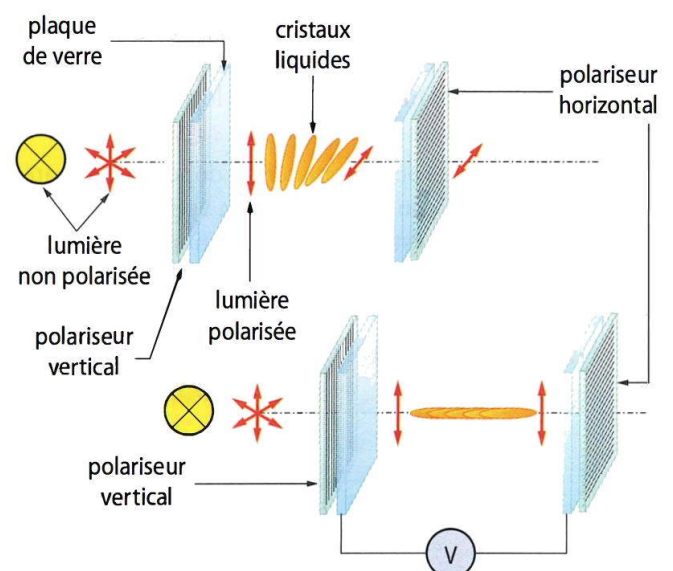


FIG. 2 – Schéma du haut, la lumière est transmise ; schéma du bas, elle n'est pas transmise.

Ce type de lumière peut être obtenu grâce à un **polariseur**, ou filtre polarisant. Ainsi, un polariseur ne laisse passer la lumière que selon une certaine direction de vibration.

Les cristaux liquides ont la propriété de faire *varier la direction de polarisation* de la lumière, selon la façon dont ils sont eux-mêmes orientés. Autrement dit, ils changent le plan de polarisation de la lumière ! Entourés de polariseurs, ils peuvent donc laisser passer ou non la lumière.

Ainsi, on constate sur le schéma du haut de la figure 2 que le plan de polarisation de la lumière est tourné à 90° par le cristal liquide inséré entre les deux lames de verre, ce qui permet à la lumière de traverser deux polariseurs croisés. Sur le schéma du bas, l'état du cristal liquide est modifié par l'application d'une tension, il n'y a plus d'effet sur le plan de polarisation de la lumière, qui ne peut donc plus traverser le deuxième polariseur.

1.3 Application aux écrans

Il fallut attendre 1968 pour que George HEILMEIER, alors chercheur au sein de la firme américaine RCA, s'intéresse à la possibilité de modifier l'état des cristaux liquides par un champ électrique. En utilisant du biphényle encadré par des plaques de verre dotées d'électrodes transparentes, il montra qu'on pouvait faire apparaître des motifs, correspondant à la forme des électrodes, en appliquant à ces électrodes une tension électrique.

Après cinq années d'optimisation, la société japonaise Seiko fut la première à utiliser le procédé pour réaliser l'afficheur numérique d'une montre à quartz, suivie de près par la société Sharp pour une calculatrice. L'afficheur à cristaux liquides était né, et son succès fut immédiat. Sa structure, fondée sur des cristaux liquides encadrés d'électrodes transparentes portées par des plaques de verre, elles-mêmes entourées de polarisants, reste proche de celle des écrans actuels LCD. Cependant, il ne s'agissait encore que d'afficheurs numériques : les électrodes possédaient la forme de petits *segments* dont la disposition assurait l'affichage des chiffres, et non des minuscules « pixels » comme actuellement.

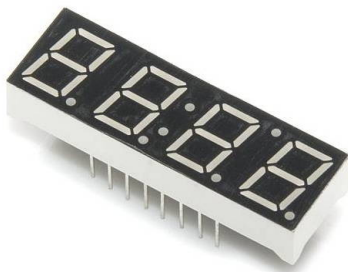


FIG. 3 – Afficheur à cristaux liquides « 7 segments ».

1.4 Écrans LCD couleur

Un écran LCD couleur est constitué de pixels, comportant chacun 3 zones, correspondant aux couleurs primaires du codage RVB. Chaque zone est commandée par une tension. Dans chaque zone, selon la tension appliquée, les

cristaux liquides laissent passer plus ou moins la lumière.

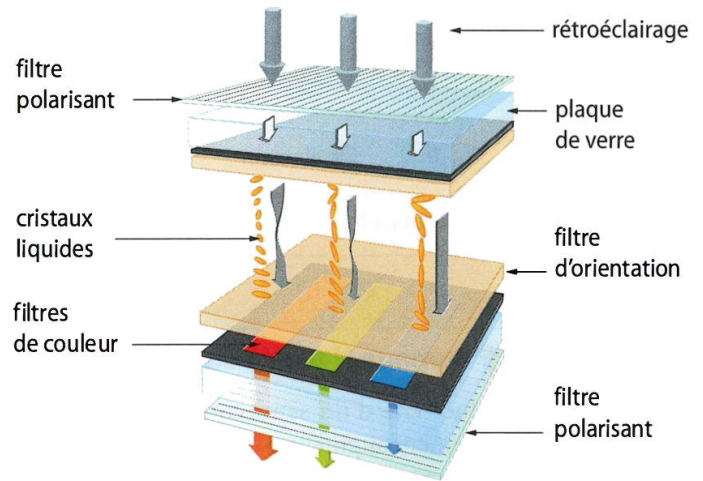


FIG. 4 – Constitution d'un pixel d'un écran LCD.

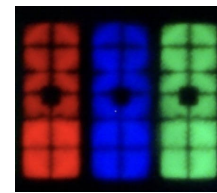


FIG. 5 – Forme des filtres de couleur d'un pixel de l'écran d'un téléviseur LCD récent (Panasonic).

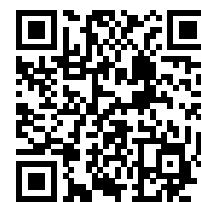
1.5 Les cristaux liquides – Sur le web

Les cristaux liquides sont un domaine qui a bousculé l'ancienne hiérarchie entre « solides amorphes » (verres et céramiques) et « milieux ordonnés » (les atomes sont « rangés » dans des *mailles cristallines* parfaitement régulières). Les cristaux liquides sont une sorte d'intermédiaire ! Wikipédia recèle le plus d'information sur le thème !



http://fr.wikipedia.org/wiki/Cristal_liquide

Cependant, comme le sujet fait l'objet de TPE de la part d'élèves, on trouve de bons mémoires, comme celui-ci, émanant de lycéens d'un lycée de Lyon :



http://www.prepa-cpe.fr/documents/Les_cristaux_liquides.pdf

Voici un extrait significatif de ce site :

« Les cristaux liquides sont caractérisés par un état intermédiaire entre la phase cristalline, où règne un ordre périodique tridimensionnel, et la phase liquide où aucun ordre n'existe : les cristaux liquides possèdent les propriétés d'anisotropie des cristaux tout en ayant un aspect fluide. La plupart des cristaux liquides sont constitués de molécules organiques qui comportent aux moins deux parties différentes, par leur structure (une partie rigide et une partie flexible) et par leurs propriétés (l'une hydrophile et l'autre hydrophobe). Les molécules, globalement neutres, peuvent posséder un moment dipolaire ce qui permet de les assimiler à un dipôle électrique permanent. Il existe de nombreuses phases pour les cristaux liquides que l'on peut répertorier dans trois grandes "familles" nématique, cholestérique et smectique.



FIG. 6 – Les différentes phases des cristaux liquides usuels. <http://cnx.org/content/m38343/latest/>.

Pour illustrer les propriétés optiques des cristaux liquides de type nématique et cholestérique, on peut écouter avec attention une conférence déjà ancienne, mais toujours intéressante pour ses expériences filmées, disponible sur Canal-U :



http://www.canal-u.tv/video/cerimes/proprietes_optiques_des_cristaux_liquides_des_types_nematiques_et_cholesteriques.9437

- A Phase smectique** Elle possède un ordre de position à une seule dimension, le matériau étant stratifié en couches pouvant glisser les unes par rapport aux autres. Dans chacune des couches, les molécules possèdent la même orientation.
- B Phase nématique** C'est la plus employée pour les applications en électronique. Elle est caractérisée par l'absence d'ordre de position. Seul un ordre d'orientation est présent et une direction moyenne est définie.
- C Phase cholestérique** Elle rejoint la phase nématique, mais en plus, son vecteur directeur possède une orientation périodique hélicoïdale ce qui est très intéressant pour les applications en électronique ».

1.6 Analyse & synthèse

- a. Après avoir relu, si nécessaire, la séance relative aux tensioactifs (TP saponification), et en s'aidant de schémas, justifier l'origine du nom smectique.
- b. Quel paramètre physique de la structure des cristaux cholestériques est à l'origine de leur changement de couleur dans les thermomètres à contact ?
- c. En s'aidant éventuellement de schémas, préciser les caractéristiques des cristaux nématiques et cholestériques à l'origine des applications citées.

2 TP – Synthèse des cristaux liquides

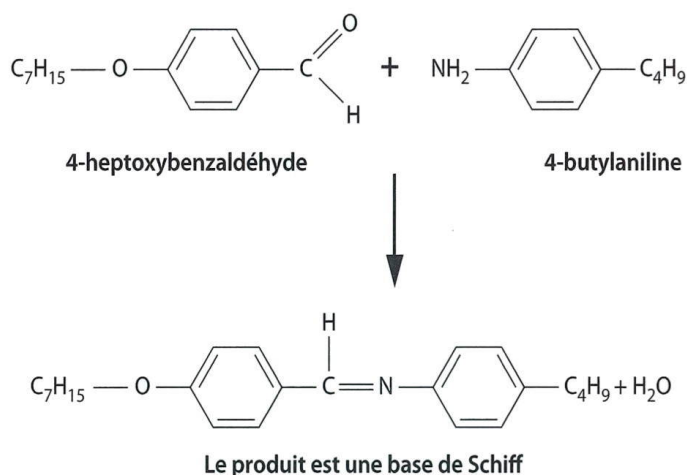
Les écrans de nombreux systèmes d'affichage (calculatrices, écrans d'ordinateur, etc.) sont à cristaux liquides. Quelles sont les propriétés d'un cristal liquide ?

2.1 Synthèse

La synthèse proposée est celle d'une imine ayant un comportement de cristal liquide. Cette imine est obtenue par *condensation* d'un aldéhyde et d'une amine avec élimination d'eau. La réaction est accélérée en milieu acide.

2.1.1 Réactifs & produits

Nous allons synthétiser une espèce par réaction du 4-heptoxybenzaldéhyde avec la 4-butylaniline en solution dans de l'éthanol pur et en présence d'acide éthanoïque. L'équation associée à cette réaction est donnée ci-dessous.



d. Entourer et nommer les groupes caractéristiques dans les réactifs et les produits. Remarque : l'imine est un composé organique caractérisé par une double liaison carbone-azote, l'azote étant aussi simplement lié à un autre carbone.

L'amine et l'aldéhyde utilisés sont solubles dans l'éthanol, quelle que soit la température, alors que l'imine préparée y est soluble à chaud, mais très peu à froid.

L'amine et l'aldéhyde utilisés sont des produits dangereux. Ils sont nocifs ou toxiques par inhalation, par contact avec la peau et par ingestion.

e. Quelles précautions faut-il prendre lors du mode opératoire ?

2.2 Mode opératoire

- Introduire 5 mL d'éthanol pur dans un ballon.
- Mettre des gants et des lunettes et placer le ballon, à l'aide d'un valet, sous la hotte.
- Utiliser une pipette graduée de 1,0 mL, munie d'un pipeteur, pour introduire dans le ballon 0,45 mL de

4-heptoxybenzaldéhyde.

- Utiliser une autre pipette graduée de 1,0 mL, munie d'un pipeteur, pour introduire 0,32 mL de 4-butylaniline.
- Introduire dans le ballon quatre gouttes d'acide éthanoïque pur.
- Adapter un réfrigérant à eau sur le ballon et chauffer à reflux à environ 90 °C pendant 30 minutes (maintenir une douce ébullition).

f. Quelle est l'utilité du support élévateur ?

- Quelques minutes avant la fin du chauffage, préparer un bain d'eau glacée et y placer une éprouvette graduée contenant 2 mL d'éthanol.
- Au bout de 30 minutes, arrêter le chauffage, retirer le chauffe-ballon et laisser se condenser les vapeurs.
- En maintenant la circulation d'eau dans le réfrigérant, laisser refroidir le ballon à l'air, puis dans un mélange eau-glace. Refroidir fortement le milieu réactionnel.
- Filtrer les cristaux obtenus sur filtre Büchner. Retirer la pierre ponce, arrêter l'aspiration. Rincer le ballon et les cristaux avec deux fois 1 mL d'éthanol froid, puis remettre l'aspiration.

Mode opératoire pour la filtration sur filtre Büchner ou filtration sous vide :

1. Placer un filtre rond, éventuellement l'humidifier (avec très peu d'éthanol froid) pour assurer l'étanchéité ;
2. Verser le mélange hétérogène dans le Büchner, sans aspiration ;
3. Connecter le tube à vide, lancer l'aspiration ;
4. Déconnecter le tube à vide, couper l'aspiration ;
5. Rincer ballon & cristaux tel qu'indiqué dans le protocole et reprendre l'aspiration ;
6. Déconnecter le tube à vide, couper l'aspiration, récupérer le solide & filtrat dans un flacon DTQD solvant.

g. Écrire l'équation de la réaction de la synthèse. À quelle catégorie appartient-elle ?

h. Vérifier que la formule brute de la 4-butylaniline est $C_{10}H_{15}N$ et que celle de la 4-heptoxybenzaldéhyde est $C_{14}H_{20}O_2$.

Vérifier que les masses molaires valent respectivement $149,23 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ et $220,31 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Vérifier que le mélange réalisé est stœchiométrique, sachant que les masses volumiques valent respectivement $0,942 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ et $0,990 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$.

i. Quel est le rôle de l'éthanol ?

j. Quel est le rôle de l'acide éthanoïque ?

k. Que se passe-t-il lors du refroidissement ?

l. Pourquoi rince-t-on les cristaux avec de l'éthanol froid ? Pourquoi arrête-t-on l'aspiration lors du rinçage ?

2.3 Recristallisation

2.3.1 Principe

Les espèces solides obtenues par synthèse organique ou extraits des substances naturelles sont souvent contaminées par de faibles quantités d'impuretés. Une technique pour les purifier est la recristallisation, fondée sur leur différence de solubilité à chaud et à froid dans les solvants.

Elle consiste à dissoudre le solide à purifier dans une faible quantité de solvant ou d'un mélange de solvants chauds, généralement à l'ébullition, puis à refroidir la solution pour provoquer la cristallisation du solide. Le produit ainsi recristallisé est ensuite isolé par filtration. Les impuretés sont en partie éliminées avec le filtrat.

2.3.2 Mode opératoire

- Récupérer les cristaux obtenus dans un erlenmeyer bien sec, y ajouter 2 ou 3 mL d'éthanol pur, adapter un ré-

frigérant à air et chauffer au bain-marie jusqu'à dissolution complète (si nécessaire, ajouter un peu d'éthanol).

- Refroidir l'erlenmeyer à l'air, puis dans un mélange glace-sel.
- Filtrer ensuite sur filtre Büchner, rincer avec 1 mL d'éthanol froid et essorer les cristaux.
- Les placer sur un verre de montre taré et les mettre à l'étuve. Les peser lorsqu'ils sont secs.

m. Quelle est l'utilité de la recristallisation ? Justifier le choix du solvant utilisé pour la recristallisation. Quel est le rôle du mélange glace-sel ?

n. Calculer la masse de produits que l'on obtiendrait si la transformation chimique était totale.

o. Calculer le rendement de cette synthèse. Pour quelles raisons celui-ci n'est-il pas de 100 % ?

2.4 Propriétés du cristal liquide

2.4.1 Propriétés optiques

- Placer deux plaques polaroïd sur un rétroprojecteur.
- Laisser une plaque fixe et faire tourner la seconde. Régler la position des deux plaques de telle façon que l'intensité lumineuse soit nulle après leur traversée.

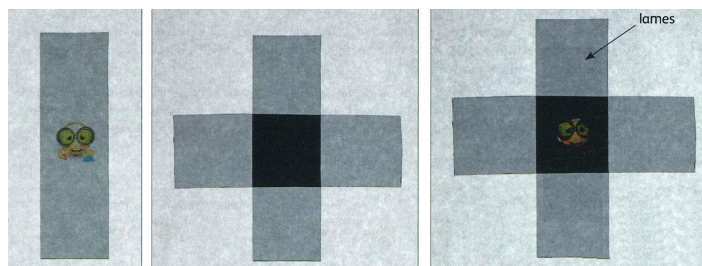


FIG. 7 – Observation d'un petit objet en cristal liquide.

- Sur une boîte de Pétri, poser un peu de produits recristallisés et chauffer à l'aide d'un sèche-cheveux. Observer au microscope polarisant, polariseur et analyseur croisés.

p. Lorsque l'intensité lumineuse est nulle après la traversée des polaroïds, que peut-on en déduire sur les directions relatives des axes de chaque polaroïd ?

q. L'eau et l'éthanol modifient-ils la direction de polarisation d'une lumière polarisée ? Même question pour le cristal liquide synthétisé.

2.4.2 Caractérisation sur banc Köfler

Le banc Köfler est un appareil permettant de mesurer la température de fusion d'un produit chimique. Il s'agit d'une plaque chauffante présentant un gradient de température, sur laquelle on déplace un échantillon du produit chimique.

1. Plaque chauffante présentant le gradient de température ;
2. Interrupteur marche/arrêt ;
3. Règle des températures, de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ à $250 \text{ }^\circ\text{C}$;

4. Curseur de mesure ;
5. Index de lecture de la température sur la règle ;
6. Pissette d'alcool à 95 °C pour nettoyer le banc après usage ;
7. Micro spatule pour déposer une très petite quantité de l'échantillon ;
8. Gamme d'échantillons de référence.

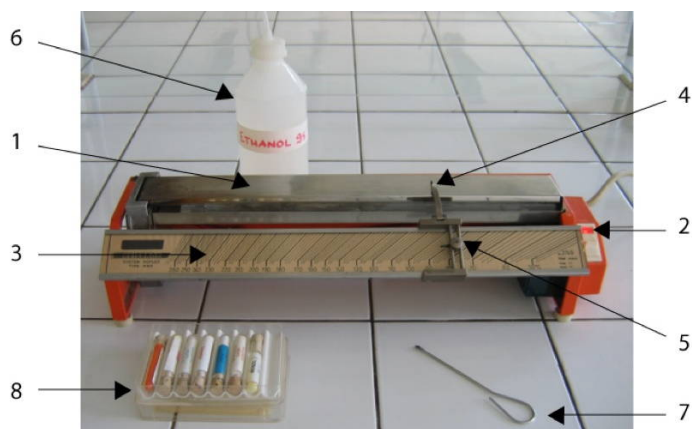


FIG. 8 – Banc Köfler et ses accessoires.

Cette mesure permet d'identifier rapidement un composé pur parmi d'autres, ou encore de vérifier le degré de pureté d'un échantillon connu, pour constater un mélange ou une addition intempestive ou frauduleuse.

- Placer quelques cristaux sur un banc Köfler et les déplacer lentement dans le sens des températures croissantes. Observer, si possible avec une loupe, l'évolution des cristaux et chercher à déterminer sa température de fusion.

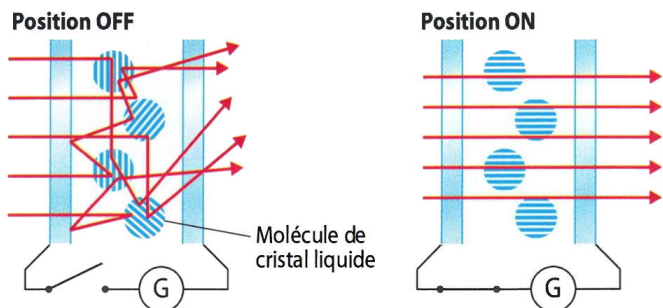
r. Le produit se comporte-t-il comme un solide pur vis-à-vis de la fusion ? Présente-t-il un seul point de fusion ?

s. Conclure quant aux propriétés remarquables d'un cristal liquide.

3 Exercices pour la séance n° 29 – Cristaux liquides

28.1 Des vitres intelligentes

Certaines vitres (salles de bains, guichets de sécurité dans les banques) sont translucides (laiteuses). Lorsqu'on leur applique une tension électrique, elles deviennent transparentes. Il suffit alors de supprimer cette tension électrique pour que ces vitres redeviennent translucides.

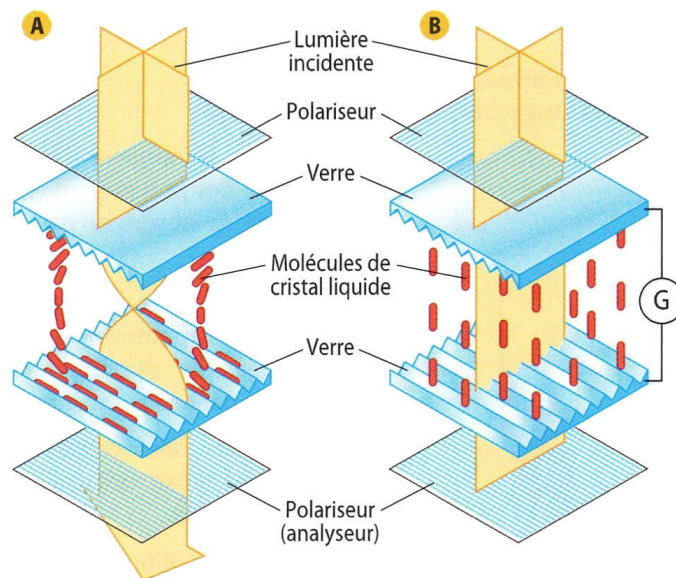


1. À l'aide du schéma ci-dessus, expliquer, en quelques lignes, le principe de fonctionnement de ces vitrages.
2. Nommer le phénomène lumineux qui opère lorsque le vitrage est en position « off ».

28.2 Afficheur à cristaux liquides

Un afficheur fait varier la transparence d'un milieu, qui s'opacifie ou s'éclaircit selon le champ électrique appliqué. Ce milieu est constitué de molécules de cristal liquide. Il est limité par deux lames de verre métallisées transparentes formant des électrodes. Ces lames sont elles-mêmes comprises entre un polariseur et un analyseur croisés. Le polariseur et l'analyseur sont des plaques de polaroïd.

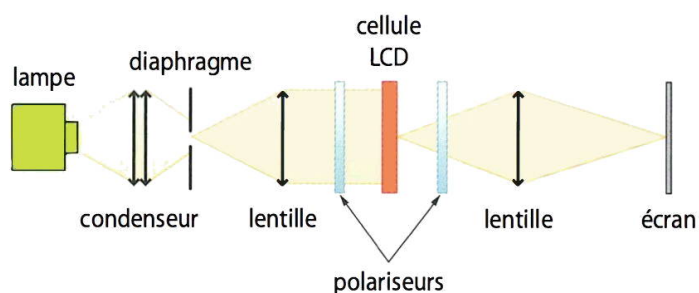
Les surfaces internes des électrodes sont revêtues d'une couche en plastique d'alignement comportant des stries très fines, sur lesquelles les molécules extrêmes de cristal liquide viennent se loger en s'orientant.



1. En l'absence de champ électrique, comment s'orientent spontanément les molécules de cristal liquide ?
2. L'ensemble du dispositif est-il opaque ou transparent à la lumière ?
3. Comment se comportent les molécules de cristal liquide lorsqu'un champ électrique est appliqué ?
4. L'ensemble du dispositif est-il opaque ou transparent à la lumière ?

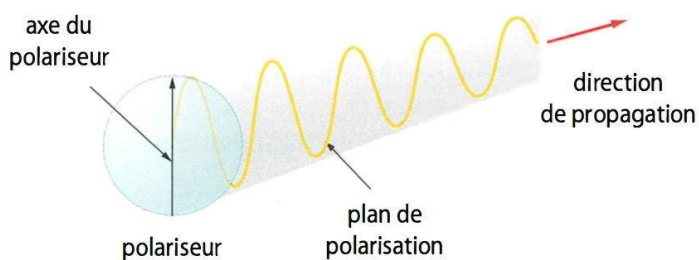
28.3 Optique des cristaux liquides

Une cellule LCD est constituée de cristaux liquides. Pour comprendre le comportement des cristaux liquides, on réalise le montage optique suivant :

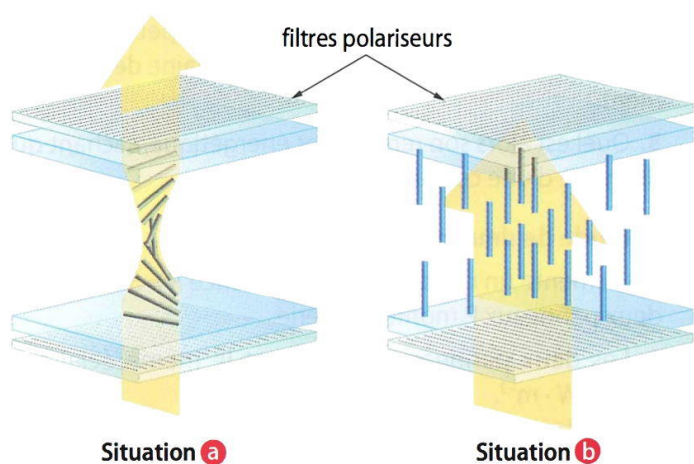


Un polariseur polarise la lumière, c'est-à-dire qu'il ne permet que la propagation de la lumière selon l'axe du polariseur.

Si l'on n'applique aucun champ électrique aux bornes de la cellule LCD, on observe qu'il faut que les deux polariseurs forment un angle de 90° (on dit qu'ils sont « croisés ») entre leurs axes de polarisation pour observer de la lumière sur l'écran.



Si l'on applique un champ électrique aux bornes de la cellule LCD, les deux polariseurs croisés ne laissent plus passer la lumière.



1. À l'aide de vos connaissances et en effectuant une recherche documentaire, donner l'intérêt, dans un montage optique, d'utiliser : un condenseur ; un diaphragme, une lentille convergente.
2. Que peut-on dire de l'effet des cristaux liquides sur le plan de polarisation d'une lumière polarisée ?

3. Quelle situation traduit la présence d'un champ électrique ? Comment s'orientent les cristaux liquides dans ce cas ?

28.4 Dureté d'une eau (révision !)

La dureté d'une eau est exprimée en degré hydrotimétrique D. 1 D correspond à une concentration de $1,00 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en ions calcium Ca^{2+} . Une eau est dite douce si sa dureté est inférieure à 15 degrés hydrotimétriques, et dure si sa dureté est supérieure à 15 degrés hydrotimétriques.

On étudie dans un premier temps la dureté d'une eau usée. Le stéarate de sodium (Na^+ , $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{CO}_2^-$) présent dans le savon précipite avec les ions calcium de manière quantitative (= la réaction est totale). Le pouvoir moussant du savon en est donc diminué.

1. Écrire l'équation de la réaction entre les ions calcium et le stéarate de sodium en solution aqueuse.
2. Une solution de savon, placée dans la burette, est préalablement étalonnée à l'aide d'un volume $V_E = 20 \text{ mL}$ d'une eau contenant $c_0 = 4,01 \times 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ d'ions calcium Ca^{2+} . La solution ne montre un pouvoir moussant, apprécié par la persistance de la mousse après agitation de l'eau, qu'à partir d'un ajout de 30,0 mL de la solution de savon. Un échantillon de 25,0 mL d'eau usée demande 3,0 mL de solution savonneuse avant de mousser de façon persistante.

- 2.1. Quelle est la concentration molaire en ions calcium de cette eau usée ?
- 2.2. Quel est le titre hydrotimétrique de cette eau ? Conclure quant à sa dureté.
3. Les ions calcium présents dans une eau minérale peuvent être dosés par l'acide éthylènediaminetétraacétique (EDTA) plus simplement noté H_4Y . Les ions calcium forment un ion complexe $[\text{CaY}]^{2-}$ incolore avec l'ion éthylènediaminetétraacétate Y^{4-} . Cette réaction est quantitative. Le dosage des ions calcium est effectué dans un tampon ammoniacal de $\text{pH} = 10$ en présence d'un indicateur de fin de réaction, le Noir Ériochrome T (NET), triacide noté NaH_3I . Les ions calcium forment un complexe $[\text{CaI}]^{2-}$ rouge couleur lie de vin avec cet indicateur de fin de réaction. Un volume de 50,0 mL d'une eau minérale, en présence de 10,0 mL de tampon ammoniacal et de Noir Ériochrome T, est dosé par le dihydrogéoéthylènediaminetétraacétate de sodium (2Na^+ , H_2Y^{2-}) à $1,00 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Le virage a lieu pour un volume de 16,00 mL de solution titrante versée.
 - 3.1. Tracer le diagramme de prédominance acido-basique des différentes formes acido-basiques de l'EDTA, en fonction du pH ($\text{p}K_A = 2,0 - 2,7 - 6,2 - 10,3$ pour l'acide éthylènediaminetétraacétique). Quelle espèce prédomine à $\text{pH} = 10$?
 - 3.2. Quel est le titre hydrotimétrique de l'eau minérale ?

4 Correction du TP de la séance n° 26 – Cellules photovoltaïques

Si l'on cherche à faire le maximum de mesures dans le « coude » du graphique $\mathcal{P} = f(U)$, il est plus facile de remplir au fur et à mesure un tableau sous Latis Pro, préalablement préparé :

	R	U	I	P
	Ω	V	A	W
1				=U*I
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				

FIG. 9 – Préparation d'un tableau de valeurs sous Latis Pro, avec la formule $\mathcal{P} = U \cdot I$ pour la puissance.

On aura « recopié vers le bas » la formule donnant la puissance électrique \mathcal{P} , avant même d'entrer les valeurs. On peut alors facilement ajouter des lignes à ce tableau, afin d'approcher la zone de puissance maximale :

R	U	I	P
Ω	V	A	W
0 Ω	7,5 mV	28 mA	210 μ W
10 Ω	0,346 V	27,3 mA	9,446 mW
20 Ω	0,581 V	25,8 mA	14,99 mW
26 Ω	0,688 V	24,1 mA	16,581 mW
27 Ω	0,703 V	23,8 mA	16,731 mW
28 Ω	0,716 V	23,4 mA	16,754 mW
29 Ω	0,729 V	23,1 mA	16,84 mW
30 Ω	0,74 V	22,8 mA	16,872 mW
31 Ω	0,751 V	22,4 mA	16,822 mW
32 Ω	0,761 V	22,1 mA	16,818 mW
33 Ω	0,771 V	21,8 mA	16,808 mW
34 Ω	0,782 V	21,4 mA	16,735 mW
36 Ω	0,798 V	20,7 mA	16,519 mW
40 Ω	0,826 V	19,5 mA	16,107 mW
50 Ω	0,882 V	16,7 mA	14,729 mW
60 Ω	0,871 V	16,6 mA	14,459 mW
70 Ω	0,896 V	14,4 mA	12,902 mW
80 Ω	0,914 V	12,6 mA	11,516 mW
90 Ω	0,925 V	11,2 mA	10,36 mW
100 Ω	0,934 V	10,1 mA	9,433 mW

FIG. 10 – Valeurs de mesures typiques.

Une fois le graphique $\mathcal{P} = f(U)$ dressé, l'usage du réticule permet de trouver la puissance maximale \mathcal{P}_m , ici :

$$\mathcal{P}_m = 16,856 \text{ mW} \quad \text{pour} \quad R = 32 \Omega$$

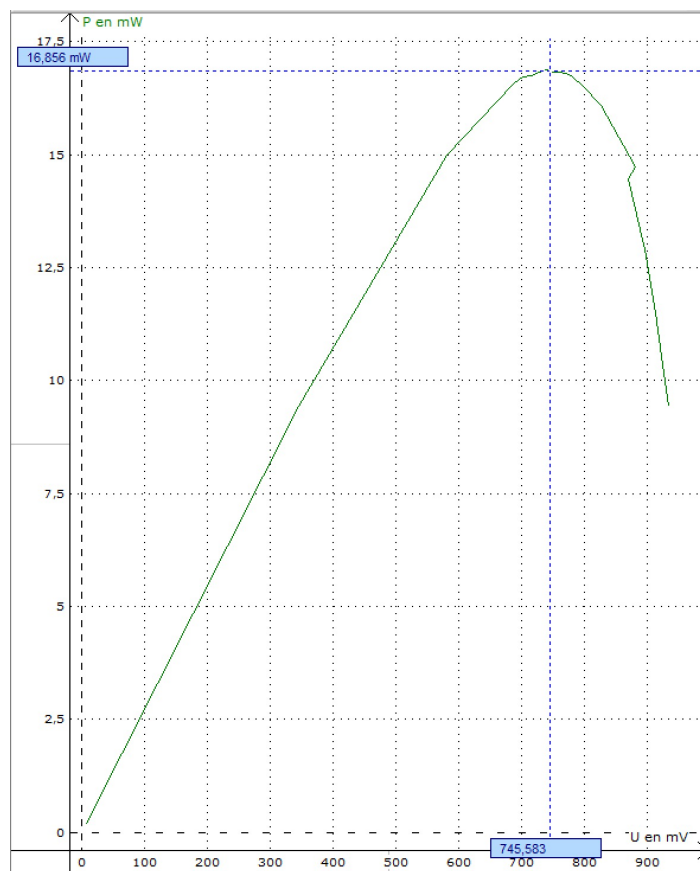


FIG. 11 – Courbe $\mathcal{P} = f(U)$ et mesure de la puissance maximale, extremum de cette courbe.

Le calcul du rendement n'est alors qu'une formalité. L'énergie lumineuse reçue est donnée par $\mathcal{P}_{\text{lum}} = E \cdot S$, avec E l'éclairement mesuré au luxmètre et S la surface du capteur photovoltaïque. Le rendement s'en déduit :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_m}{\mathcal{P}_{\text{lum}}}$$

Il n'est pas rare de trouver des rendements de l'ordre de 10 %, ce qui paraît peu ; mais n'oublions pas qu'il s'agit d'une énergie *gratuite* (une fois l'installation photovoltaïque payée...)

5 Correction des sujets de Bac (révisions !)

N° 3 p. 187 – Rendement du puits à la roue

a. D'après le document 1, lors de l'évaluation du puits à la roue, on prend en compte tous les procédés de la chaîne énergétique : approvisionnement en énergie primaire, production, transport, stockage et distribution et utilisation du dihydrogène.

D'après le document 4, il faut donc tenir compte du rendement de la production de dihydrogène, du rendement de son transport, de sa compression et de son stockage, ainsi que du rendement de la PAC (pile à combustible). Selon les cas envisagés, il faut aussi tenir compte du rendement de la production de l'énergie électrique et du rendement du transport de l'énergie électrique.

Le rendement de la PAC doit être déterminé. Connaissant l'énergie fournie effectivement par la PAC au véhicule pour 100 km parcourus, soit 1,14 kg de dihydrogène consommé, il faut déterminer l'énergie totale libérée par la pile dans ces conditions.

La température optimale de fonctionnement des PAC mises en jeu étant inférieure à 100 °C, la pile fonctionne en produisant de l'eau liquide.

La quantité de dihydrogène contenue dans 1,14 kg de dihydrogène vaut :

$$n(\text{H}_2) = \frac{m}{M(\text{H}_2)} = \frac{1,14 \times 10^3}{2,0} = 5,7 \times 10^2 \text{ mol}$$

L'énergie E_t fournie par la pile vaut donc :

$$E_t = E(\text{eau liquide}) \cdot n(\text{H}_2) = 1,59 \times 10^8 \text{ J}$$

Le rendement de la PAC sans reformeur est alors :

$$\rho(\text{PAC}) = \frac{E_{\text{upac}}}{E_t} = \frac{87,8 \times 10^6}{1,59 \times 10^8} = 55 \%$$

Lorsque l'on considère deux étapes successives, l'énergie reçue lors de la deuxième étape est l'énergie utile produite lors de la première étape :

$$E_{\text{reçue}}(2) = E_{\text{utile}}(1)$$

Ainsi, le rendement global des deux étapes est le produit du rendement de chaque étape :

$$\rho = \rho_1 \cdot \rho_2 = \frac{E_{\text{utile}}(1)}{E_{\text{reçue}}(1)} \cdot \frac{E_{\text{utile}}(2)}{E_{\text{reçue}}(2)}$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{E_{\text{utile}}(2)}{E_{\text{reçue}}(1)}$$

Ce résultat se généralise à plusieurs étapes successives.

- Pour un véhicule alimenté par une PAC dont le dihydrogène a été produit par électrolyse avec une électricité issue de l'énergie nucléaire :

$$\begin{aligned} \rho &= \rho(\text{production nucléaire}) \\ &\cdot \rho(\text{transport électricité}) \\ &\cdot \rho(\text{électrolyseur}) \\ &\cdot \rho(\text{distribution, compression et stockage H}_2) \\ &\cdot \rho(\text{PAC}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho &= 0,35 \times 0,93 \times 0,60 \times 0,75 \times 0,55 \\ \rho &= 0,081 = 8,1 \% \end{aligned}$$

- Pour un véhicule alimenté par une PAC dont le dihydrogène a été produit par électrolyse avec une électricité issue du gaz naturel :

$$\begin{aligned} \rho &= \rho(\text{production gaz naturel}) \\ &\cdot \rho(\text{transport gaz naturel}) \\ &\cdot \rho(\text{électrolyseur}) \\ &\cdot \rho(\text{distribution, compression et stockage H}_2) \\ &\cdot \rho(\text{PAC}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho &= 0,60 \times 0,93 \times 0,60 \times 0,75 \times 0,55 \\ \rho &= 0,14 = 14 \% \end{aligned}$$

- Pour un véhicule alimenté par une PAC dont le dihydrogène a été produit par conversion du méthane :

$$\begin{aligned} \rho &= \rho(\text{production H}_2) \\ &\cdot \rho(\text{distribution, compression et stockage H}_2) \\ &\cdot \rho(\text{PAC}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho &= 0,75 \times 0,75 \times 0,55 \\ \rho &= 0,31 = 31 \% \end{aligned}$$

- Pour un véhicule alimenté par une PAC dont le dihydrogène a été produit dans le véhicule, à l'aide d'un reformeur à partir de méthanol, le rendement de la PAC n'étant plus que de 45 % ($\rho' = 0,45$), compte tenu du poids du reformeur embarqué :

$$\begin{aligned} \rho &= \rho(\text{production H}_2 \text{ reformeur}) \\ &\cdot \rho'(\text{PAC}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho &= 0,60 \times 0,45 \\ \rho &= 0,27 = 27 \% \end{aligned}$$

La filière ayant le meilleur rendement du puits à la roue est donc la filière véhicule PAC H₂ issu du gaz naturel.

- b. Cette filière n'est pas celle qui correspond au meilleur bilan carbone. C'est la filière électrolyse de l'eau avec électricité nucléaire ou renouvelable qui possède le meilleur bilan carbone.
- c. L'aspect financier n'est pas pris en compte dans cette

analyse, il est pourtant très important pour le consommateur. Il faut tenir compte du coût de l'énergie, des matières premières et certainement, dans le futur du coût de la capture et du stockage du dioxyde de carbone émis du puits à la roue.