

Les diodes électroluminescentes organiques : des sources « plates » de lumière

Lionel Hirsch est directeur de recherche au CNRS, au laboratoire de l'Intégration des Matériaux au Systèmes (IMS) à l'École Nationale Supérieure de Chimie et de Physique de Bordeaux (ENSCPB).

1 De l'éclairage à l'affichage, une évolution progressive de l'utilisation des sources de lumière

1.1. Les sources de lumière

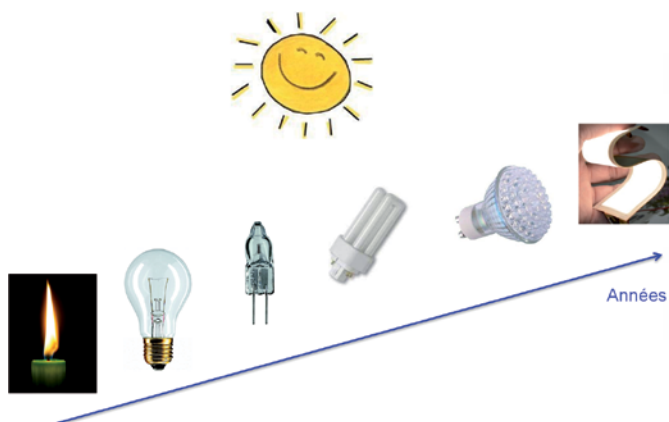
La lumière est la source de la vie. Certes, le soleil nous éclaire la journée, mais avec l'évolution de l'humanité, est venu le besoin d'avoir de la lumière la nuit, et les premières sources de lumière étaient le feu, puis la bougie et la lampe à incandescence, qui est restée très longtemps et que l'on trouve encore sur le marché. Suivent les lampes halogènes, et nous utilisons encore aujourd'hui les lampes fluo-compactes que sont des tubes néons (**Figure 1**). Toutes ces sources de lumière font appel au principe physique du

rayonnement du corps noir (le corps noir absorbe la totalité des rayons incidents) où c'est la chaleur qui produit la lumière.

De nouvelles sources de lumière sont apparues récemment : les *diodes électroluminescentes* ; les blanches qui servent au rétro-éclairage des téléphones portables ou des ordinateurs, et les colorées utilisées pour certains phares de voitures ou d'autres objets de la vie courante (par exemple des afficheurs pour la signalétique). Dans ce cas, la source ne produit que le rayonnement visible sans créer de la chaleur. Dans le cas des nouvelles **diodes électroluminescentes organiques** (« *Organic Light-Emitting Diode* », OLED), ce sont des surfaces qui émettent de la lumière.

Figure 1

Évolution des sources de lumière au cours des années.



1.2. Les écrans

Les écrans émettent de la lumière. La **Figure 2** montre l'évolution des écrans d'ordinateurs depuis les premiers avec un tube cathodique, dans lequel c'est le faisceau d'électrons qui percute l'écran et entraîne l'émission de la lumière. Les ordinateurs portables ne pouvaient être réalisés avec cette technologie trop encombrante et qui a besoin de tensions élevées. Les premiers écrans plats utilisés pour les ordinateurs portables sont apparus dans les années 1980, et ceux qui existent encore de nos jours sont à base de cristaux liquides (« liquid

crystal display », LCD. Voir le **Chapitre de J.-C. Flores** dans l'ouvrage *Chimie et technologies de l'information*, EDP Sciences, 2014).

La **Figure 3** montre l'évolution du poids respectif des différentes technologies utilisées pour réaliser les écrans de télévision. On retrouverait la même évolution dans le cas des écrans pour les ordinateurs.

On observe que les anciennes technologies disparaissent toujours au profit d'une autre technologie. Les premiers écrans plats LCD utilisaient des rétro-éclairages réalisés avec des tubes néons. Il en

Figure 2

Évolution des écrans d'ordinateurs au cours des années.



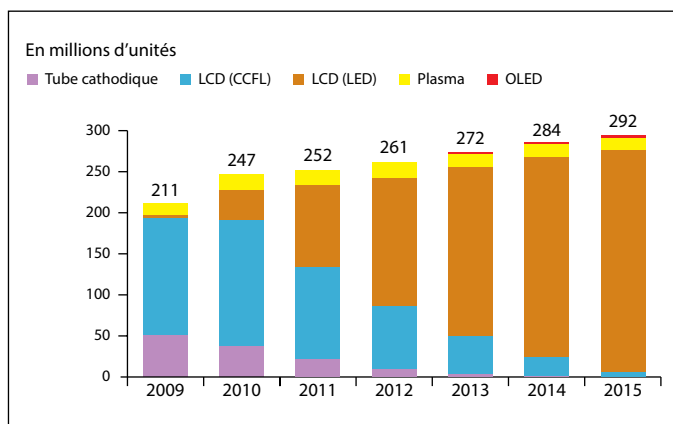


Figure 3

Évolution temporelle des différentes technologies utilisées pour les écrans de télévisions.

Source : d'après Les Echos, Display search.

reste encore quelques-uns, mais ils sont très rares ; les écrans LCD ont maintenant un rétro-éclairage par des diodes électroluminescentes, tout simplement parce que c'est beaucoup moins encombrant, et le rendement énergétique est meilleur.

Les écrans plasma sont plus rarement utilisés car, s'ils sont merveilleux du point de vue du contraste de l'image, ils sont néanmoins énergivores et encombrants. Malgré tout, c'est une technologie qui perdure.

1.3. L'évolution de l'éclairage et de la microélectronique

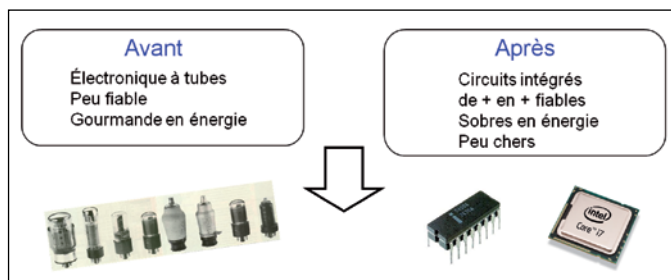
L'éclairage et la microélectronique ont évolué parallèlement (Figure 4). Autrefois, l'électronique fonctionnait avec des tubes, et utilisait les triodes, les pentodes¹ et tous

ces composants qui permettaient de faire du traitement du signal avant l'apparition du transistor (à propos du transistor, voir le **Chapitre de Y. Le Tiec** de l'ouvrage *Chimie et technologies de l'information*, EDP Sciences, 2014).

Avec le transistor est apparue une technologie plus robuste et plus compacte. On travaille maintenant avec des circuits intégrés sur des surfaces réduites avec des taux d'intégration très élevés. L'épaisseur des transistors est de l'ordre de quelques centaines de nanomètres à quelques microns. Autre point important : cette technologie est aussi beaucoup plus fiable et sobre en énergie.

Figure 4

Technologies avant le transistor, transistor et dernier microprocesseur Intel : un même cheminement pour l'affichage et l'éclairage.



1. Le triode est le premier dispositif amplificateur d'un signal électronique composé d'une anode, d'une cathode et d'une grille entre les deux. Dans un pentode, trois grilles séparent l'anode et la cathode pour limiter les pertes.

2 Les diodes électroluminescentes organiques (OLED)

2.1. Les semi-conducteurs organiques

Les matériaux organiques contiennent des liaisons carbone-hydrogène (C-H) et des liaisons carbone-carbone (C-C). L'éthylène est la plus petite molécule qui pourrait être considérée comme un semi-conducteur² organique, mais elle n'en est pas vraiment un, car l'éthylène est un gaz.

Rappelons d'abord les différents modes de liaisons carbone-carbone. Nous

2. Un semi-conducteur est un matériau dont la conductivité électrique se situe entre celle d'un isolant et celle d'un conducteur. Au sujet des semi-conducteurs organiques, voir le **Chapitre d'I. Chartier** de *Chimie et technologie de l'information*, EDP Sciences, 2014.

connaissons tous au moins deux états naturels du carbone, qui correspondent à deux types de liaisons C-C très différentes : le graphite de la mine de crayon et le diamant. Ces deux matériaux sont complètement différents alors que ce sont les mêmes atomes qui interviennent. La nature de la liaison chimique C-C est donc primordiale pour les propriétés physiques du matériau.

2.1.1. Exemple de l'éthylène

Dans le cas des semi-conducteurs organiques comme dans la petite molécule d'éthylène, la liaison C-C est une double liaison. Voyons ce que cela signifie du point de vue des niveaux d'énergie des électrons qui interviennent dans la liaison entre les deux atomes, comment ils se répartissent dans ces niveaux d'énergie, et comment cela conduit aux notions de bande de valence et de bande de

LA CHIMIE DES SEMI-CONDUCTEURS

Sans entrer dans le détail de la théorie de la liaison chimique, examinons la **Figure 5A**. La partie gauche représente les niveaux d'énergie (E) des électrons périphériques d'un atome de carbone isolé, et la partie droite représente les niveaux d'énergie de ces électrons quand cet atome de carbone s'engage dans une double liaison C=C, comme dans le cas de la molécule d'éthylène.

On voit qu'il y a trois électrons (figurés par des flèches qui indiquent l'orientation du moment magnétique*) dans trois orbitales électroniques (figurées par des carrés) au niveau de plus basse énergie (sp^2), et un électron dans une orbitale électronique à un niveau d'énergie supérieur (2p) ; les niveaux de basse énergie sont les plus stables.

L'orbitale électronique est la zone de l'espace dans lequel un électron a le plus de chances de se déplacer. Les quatre orbitales dans lesquelles se déplacent les électrons périphériques (qui assurent les liaisons chimiques) de chaque atome de carbone d'une molécule d'éthylène sont représentées sur la **Figure 5B** : les trois orbitales sp^2 sous forme de demi-altères bleues dans un même plan (en gris), et l'orbitale 2p sous forme d'altère bleue perpendiculaire à ce plan.

Pour qu'une liaison chimique se forme entre deux atomes, il faut qu'il y ait une possibilité de recouvrement de deux orbitales, chacune d'elles contenant un électron pour former une

*Le moment magnétique est une grandeur vectorielle qui permet de mesurer l'intensité d'un champ magnétique.

nouvelle orbitale de liaison qui contiendra deux électrons. Les possibilités de recouvrement sont figurées en jaune sur cette figure.

On voit qu'entre les deux atomes de carbone, il y a deux recouvrements possibles :

- un recouvrement important entre les deux orbitales sp^2 selon l'axe de la liaison pour former une liaison appelée σ ;
- un recouvrement latéral plus faible entre les deux orbitales $2p$ pour former une liaison appelée π .

Les niveaux d'énergie possibles pour les deux électrons de la liaison σ et les deux électrons de la liaison π sont représentés sur la **Figure 5C**. Une liaison est d'autant plus forte que le niveau d'énergie de ses électrons est plus bas. On peut faire les remarques suivantes :

- pour la liaison σ , il y a deux niveaux possibles : l'un de basse énergie (σ liant), l'autre de plus haute énergie (σ^* anti-liant) ;
- il en est de même pour la liaison π , avec un niveau π liant et un niveau π^* anti-liant (**Figure 6**).

Les électrons de la double liaison $C=C$ se localisent donc à raison de deux par orbitales dans les niveaux d'énergie les plus bas. On voit donc qu'il existe, au-dessus de ces deux orbitales liantes, des orbitales anti-liantes vides à des niveaux d'énergie plus élevés, et dans lesquels les électrons peuvent aller, à condition de leur fournir un peu d'énergie.

Si dans une molécule il y a formation d'une succession de simples et de doubles liaisons $-C=C-C=C-$, il y a alors possibilité de recouvrement des orbitales liantes entre elles, ce qui correspond du point de vue énergétique à une **bande de valence**, contenant l'ensemble des niveaux σ et π (**totalement remplie d'électrons**).

Il en est de même pour les orbitales anti-liantes entre elles qui forment la **bande de conduction, vide**. Des électrons de la bande de valence pleine peuvent « sauter » dans la bande de conduction vide si on leur fournit l'énergie nécessaire.

C'est ce qui se passe dans un polymère organique semi-conducteur.

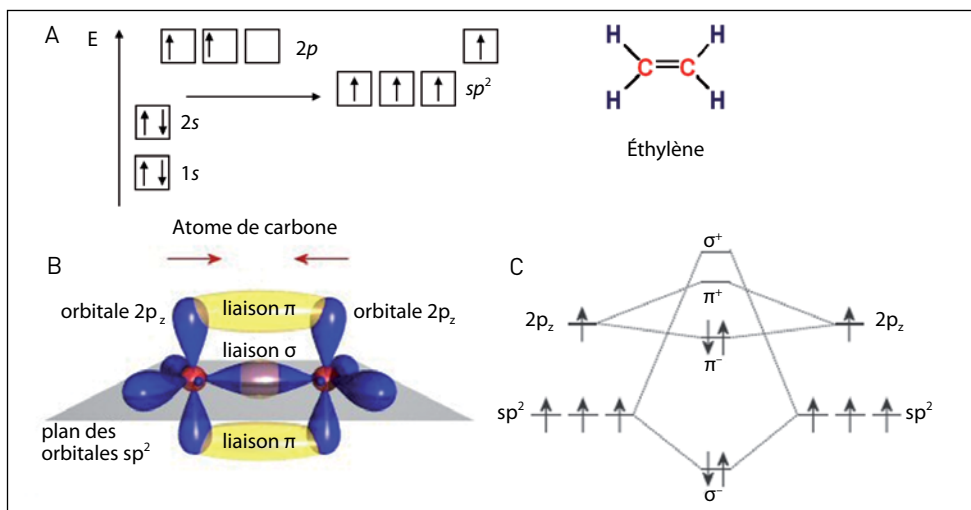


Figure 5

La molécule d'éthylène : A) niveaux d'énergie des électrons pour un atome de carbone isolé ; B) représentation des orbitales des électrons de liaison du carbone ; C) diagramme d'énergie de l'éthylène : niveaux d'énergie des électrons de la double liaison $C=C$.

Source : www.orgworld.de

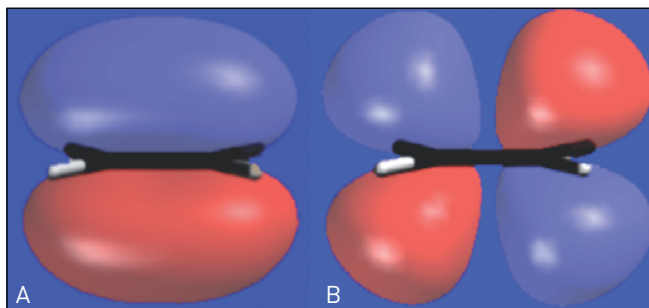


Figure 6

Représentation des orbitales de la liaison π liante (A) et de la liaison π^* anti-liante (B) de l'éthylène.

conduction (**Encart : « La chimie des semi-conducteurs »**), ainsi qu'à la notion de semi-conducteur.

2.1.2. Les familles de semi-conducteurs organiques

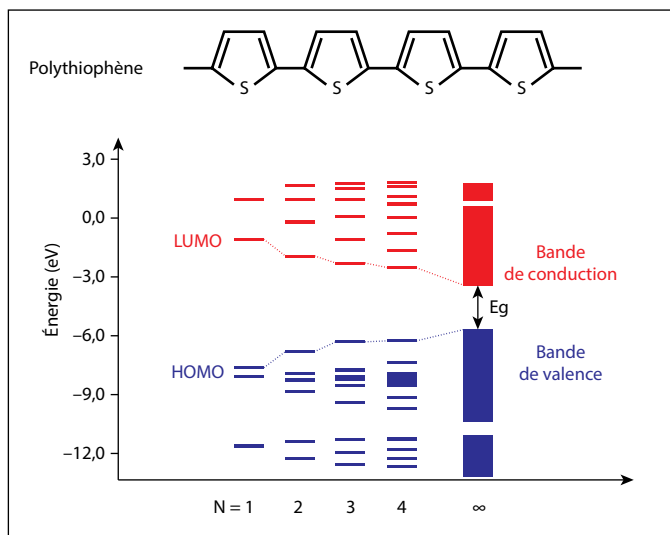
Prenons l'exemple d'un matériau polymère tel que le polythiophène (**Figure 7**), présentant une alternance de simples liaisons C-C et de doubles liaisons C=C. Dans un polythiophène, plus on allonge la chaîne, plus il y aura d'états possibles π et

σ dans la bande de valence (en bleu), et π^* et σ^* dans la bande de conduction (en rouge). Le diagramme des niveaux d'énergie possibles pour les électrons des liaisons entre les atomes de carbone de ce polymère organique ressemble plus ou moins à celui des semi-conducteurs minéraux, avec une bande de valence remplie d'électrons qui peuvent, moyennant un apport d'énergie, sauter dans la bande de conduction vide (**Figure 7**).

Figure 7

Diagramme des niveaux d'énergie possibles pour les électrons de liaisons C-C d'un polythiophène.

Source : P. Destruel, PASCO 2006.



Contrairement aux semi-conducteurs minéraux peu nombreux (il n'y a principalement que le silicium, puis le germanium et les semi-conducteurs III-IV. Ces derniers sont abordés dans le **Chapitre de B. Demotes-Mainard** de *Chimie et technologies de l'information*), pour lesquels le choix est relativement limité, dans le cas des semi-conducteurs organiques, le choix n'est principalement limité que par l'imagination des chimistes, et nous allons voir que ce choix est vaste. Les semi-conducteurs organiques sont classés en deux grandes catégories selon

la taille des molécules : les petites molécules de masse molaire relativement faible que l'on peut évaporer sous vide (**Figure 8A**), et les macromolécules que sont les matériaux polymères (**Figure 8B**).

L'intérêt des polymères est de pouvoir être mis en solution pour fabriquer des encres qui permettront d'imprimer des circuits semi-conducteurs, à température ambiante et à bas coût. Quelques exemples sont représentés sur la **Figure 9**.

Signalons que les semi-conducteurs organiques existent également dans la nature. On peut citer les β -carotènes (**Figure 10**), qui

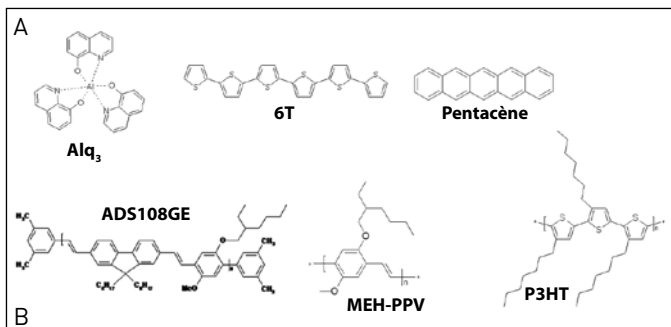


Figure 8

A) Les petites molécules sont volatiles et sont utilisées dans des procédés standards sous vide ou par dépôt de gaz porteur ; B) les macromolécules (polymères, oligomères de haut poids moléculaire) sont utilisées dans des techniques de dépôt de solutions, du simple revêtement aux techniques d'impression à jet d'encre.

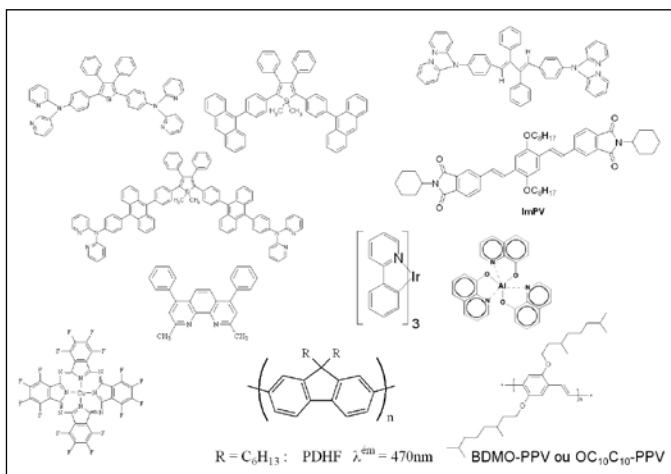
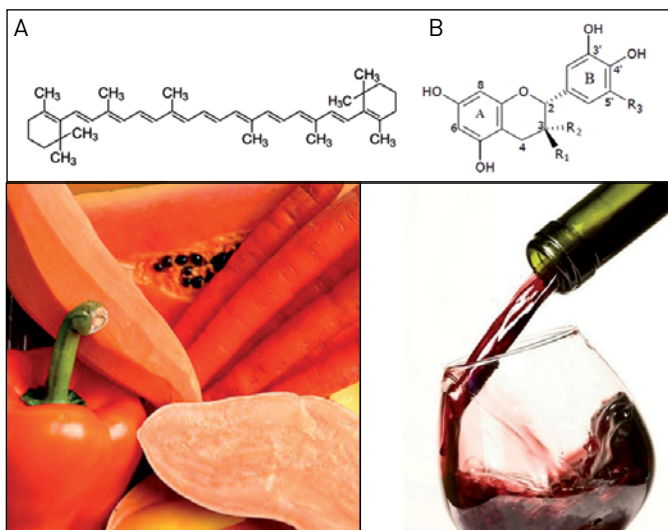


Figure 9

Exemples de polymères pour l'impression de circuits de semi-conducteurs.

Figure 10

Des molécules naturelles comme les β -carotènes (A) et les anthocyanes (B) sont des semi-conducteurs organiques.



donnent la couleur à la carotte, à certaines crevettes, et aux plumes des flamants roses quand ils mangent ces crevettes. Citons également les anthocyanes, responsables de la couleur rouge du vin. On y retrouve les alternances de simples et doubles liaisons, mais on utilise peu les propriétés semi-conductrices de ces molécules, qui ne sont pas forcément les plus stables, ni forcément les plus pures.

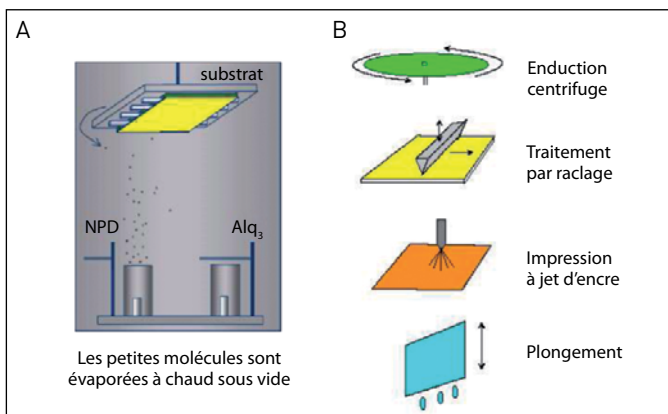
2.1.3. Les couches minces de semi-conducteurs organiques

Les semi-conducteurs organiques sont fabriqués sous forme de poudres, que les chimistes transforment en solutions colorées qui servent à préparer des encres, et pour réaliser des dépôts en couches minces.

La **Figure 11** résume les différentes méthodes de dépôt de couches minces. La technique

Figure 11

Technique de fabrication de couches minces de semi-conducteurs organiques à partir de petites molécules facilement vaporisables (A) ou à partir d'encres de polymères (B).



la plus simple est celle dérivée de la microélectronique, utilisée dans le cas des plus petites molécules. Le polymère semi-conducteur contenu dans un creuset est vaporisé à chaud sous vide, et l'on récupère la couche mince formée par le dépôt de la vapeur sur le substrat (**Figure 11A**).

Pour les plus grosses molécules, on part d'une encre, et l'on utilise la technique dite de l'enduction centrifuge (« *spin coating* », en anglais) (**Figure 11B**), qui répartit l'encre sur le substrat par la rotation. L'encre peut aussi être simplement étalée avec une raclette, ou déposée par jet d'encre, ou encore, le substrat peut tout simplement être trempé dans l'encre. Le choix de la méthode de dépôt dépendra de l'épaisseur de la couche, de la propreté du dépôt que l'on veut faire. La facilité de réalisation des couches minces de semi-conducteurs organique à partir des encres est ce qui fait la force de l'électronique organique.

2.2. L'électroluminescence organique : un peu d'histoire

Les premiers travaux sur l'électroluminescence organique commencèrent il y a cinquante ans, avec les recherches de M. Pope en 1963. Le principe de l'électroluminescence organique est simple : il consiste à partir d'une tension V appliquée au semi-conducteur organique, à injecter des trous dans la bande de valence et des électrons dans la bande de conduction. Lorsqu'un électron rencontre un trou, la recombinaison électron-trou

provoque une émission de lumière. La longueur d'onde de la lumière émise, donc sa couleur, dépend de la différence de niveau d'énergie entre la bande de valence et la bande de conduction et de la force coulombienne qui relie l'électron et le trou au moment de la recombinaison.

En 1963, les semi-conducteurs organiques connus étaient tels qu'il fallait appliquer des tensions très élevées, et les rendements de lumière obtenus étaient très faibles : il fallait se placer dans le noir pour percevoir un peu de lumière (**Figure 12**).

Pourtant, le principe utilisé dans les OLED des téléphones portables de la série Galaxy est le même, tout était déjà plus ou moins défini en 1963, mais il a fallu améliorer la compréhension des phénomènes pour aboutir à la qualité lumineuse actuelle.

Le progrès, d'un point de vue technologique, résulte des travaux réalisés chez Kodak aux États-Unis par Tang et Van Slyke sur les cellules solaires organiques à base de couches minces (**Figure 13**). Ils utilisaient des couches minces de semi-conducteur organique, de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres, déposées

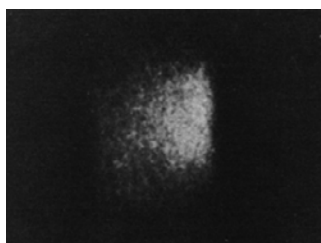


Figure 12

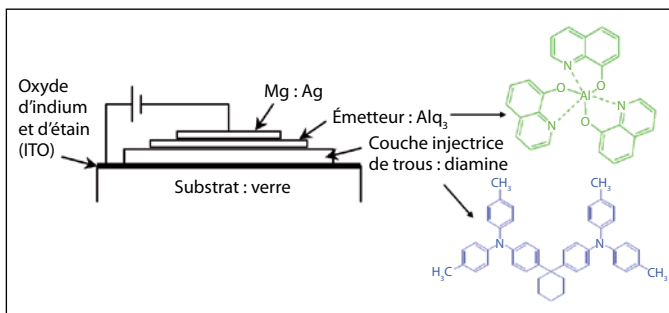
Luminosité dans le noir des premières sources électroluminescentes organiques.

Source : M. Pope. (1963).

J. Chem. Phys.

Figure 13

Schéma du dispositif de dépôt de couche mince électroluminescente sur verre de Tang et Van Slyke.
Source : Tang et Van Slyke. (1987).
Appl. Phys. Lett.



sur du verre, et alimentaient la cellule sous une tension de quelques volts. Ils se sont aperçus que la couche mince organique brillait : ils avaient mis en évidence la première diode électroluminescente fonctionnant à des tensions beaucoup plus raisonnables, de l'ordre de quelques volts.

Concernant les diodes électroluminescentes à base de polymères, les deux équipes pionnières ont été celles de Richard Friend en 1990 à l'université de Cambridge et celle d'Alan Heeger en 1991 à l'université de Santa Barbara. Ces équipes sont d'ailleurs toujours très actives dans ce domaine (Figure 14).

2.3. Principes de fonctionnement des OLED

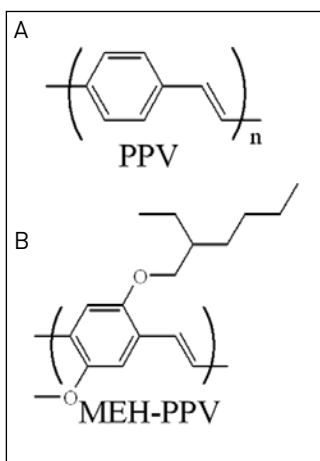
Nous avons déjà vu que globalement, le principe de fonctionnement est relativement simple puisqu'il suffit de faire passer des électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence. Comme la nature « aime bien être à l'état fondamental », s'il existe une lacune à l'état fondamental (c'est-à-dire une place vide dans la bande de valence), un électron de l'état excité y retombera. L'énergie n'étant pas perdue, elle sera réémise soit sous forme de lumière soit sous forme de chaleur. Si elle est émise sous forme de lumière, on a fabriqué une diode électroluminescente. Une diode électroluminescente de « laboratoire » est représentée sur la Figure 15.

Revenons au principe de fonctionnement de base : une lacune d'électron (un trou) dans une bande de valence pleine est équivalente à une charge positive. Quand un électron de la bande de conduction rencontre un trou de la bande de valence, ces deux charges, l'une positive, l'autre négative, forment un couple de charges appelé **exciton**. Cet exciton est

Figure 14

Familles de polymères utilisées à l'université de Cambridge (A) et à l'université de Santa Barbara (B) pour la fabrication de diodes électroluminescentes.

Sources : Burroughes et coll. (1990). *Nature*, 347 ;
Braun et Heeger (1991).
Appl. Phys. Lett., 58.



une pseudo-particule neutre qui peut se déplacer par diffusion. La recombinaison électron-trou (ou annihilation d'exciton) entraîne une émission d'énergie sous forme de phonons (chaleur) ou de photons (lumière).

Le principe de fonctionnement est résumé sur la **Figure 16** : tout se passe donc comme si à l'anode (+), il y avait injection de charges positives, et à la cathode (-) injection de charges négatives (étape 1). Ces charges se déplacent (étape 2) avant de se recombiner pour former l'exciton (étape 3). Ce dernier diffuse (étape 4) avant la recombinaison des charges (étape 5) et l'émission d'énergie.

Dans le cas des semi-conducteurs organiques, la probabilité de formation des excitons (étape 3) est très bonne (près de 100 %), mais la probabilité de recombinaison des charges avec réémission de l'énergie sous forme de lumière (étape 5) dépend du moment magnétique de l'électron. Un seul état (appelé état singulet) sur les quatre possibles permet de se recombinaison en émettant de la lumière. La conséquence est qu'il n'y a que 25 % de chance pour qu'un exciton se désexcite en émettant de la lumière (**Figure 17**).

Beaucoup d'excitons disparaissent donc sans créer d'électroluminescence. Il faut donc améliorer le rendement interne (lié au processus d'émission radiative) et le rendement externe (lié à l'émission effective de la lumière en dehors de la diode).

Depuis les années 1960, les efforts pour améliorer le

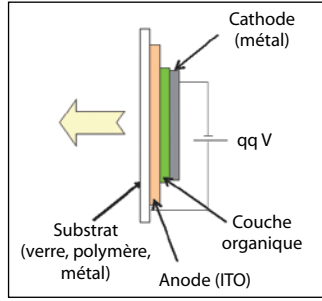


Figure 15

Schéma d'une OLED. Sa structure de base comprend : une électrode transparente (anode), une couche organique (~ 100 nm), de « petites » molécules (dépôt par évaporation) ou des polymères (dépôt par voie humide, à partir d'encre) et une électrode réfléchissante (cathode).

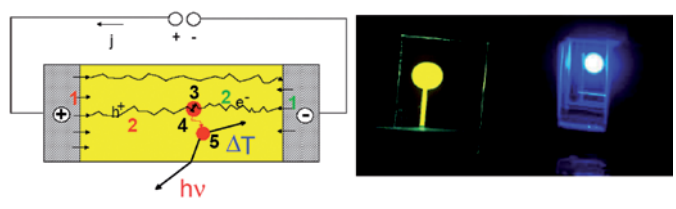


Figure 16

Les étapes du fonctionnement d'une diode électroluminescente.
 1 : injection de porteur de charge ; 2 : transport de porteur de charge ; 3 : recombinaison de charges (formation de l'exciton) ; 4 : diffusion de l'exciton ; 5 : recombinaison de l'exciton et émission de photon.

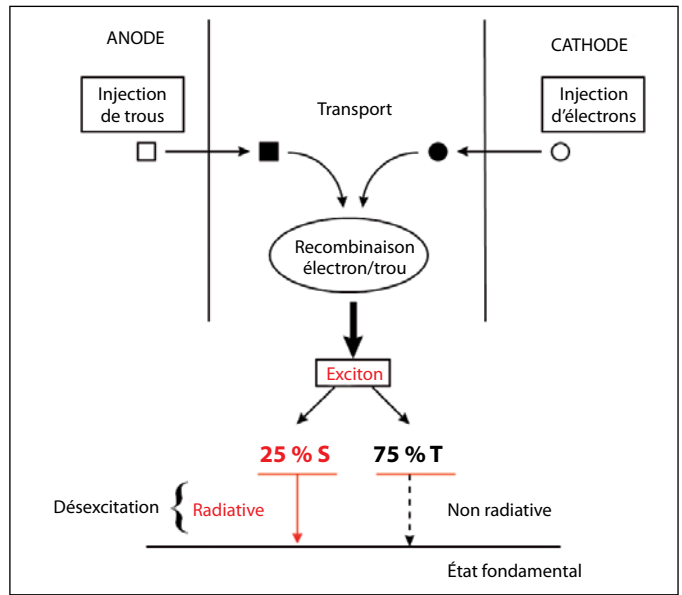
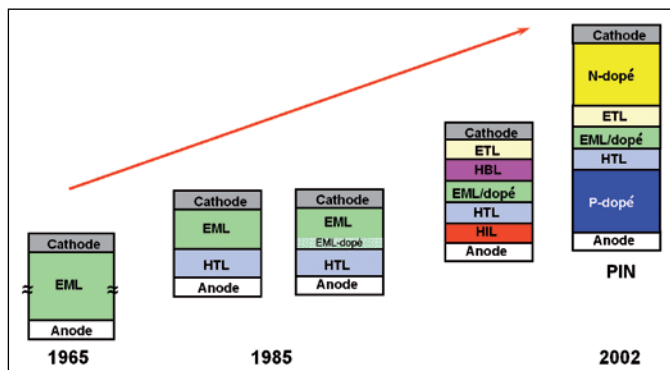


Figure 17

Schéma récapitulatif du processus de création de lumière par une OLED.

Figure 18

Évolution au cours des années des matériaux utilisés pour réaliser des diodes. Pour limiter les pertes, on confine les porteurs et l'on apporte un dopage électrique ou optique. EML = couche d'émission.



rendement interne ont porté sur (Figure 18) :

- l'élimination des pertes ;
- le confinement des charges : en utilisant des couches minces avec deux matériaux, l'un qui transporte les trous, l'autre les électrons ;
- le dopage électrique pour réduire les pertes ohmiques au niveau de l'injection des charges notamment ;
- le dopage optique qui permet d'obtenir 100 % de recombinaisons radiatives avec des matériaux phosphorescents comme certains complexes de l'iridium. Cet énorme progrès résulte des travaux réalisés à l'université de Princeton et à l'université de Californie du Sud en 1998.

Pour améliorer le **rendement externe**, il faut que la lumière produite sorte du dispositif d'émission et soit guidée jusqu'au niveau des yeux (Figure 19), car si rien n'est fait on perd environ 80 % de la lumière émise par la diode électroluminescente.

Pour réaliser ce guidage de l'onde, il faut d'une part jouer sur les valeurs relatives de diffraction de

l'oxyde d'indium-étain (ITO) et du verre, d'autre part utiliser les différentes techniques telles que les structures à microcavités, les réseaux de Bragg, les microlentilles, la rugosité de surface plus ou moins contrôlée, l'insertion de milieux diffusants, etc. De nombreux travaux ont été réalisés dans ce domaine³.

2.4. Les applications des OLED

2.4.1. Les écrans

Les applications des OLED doivent être innovantes par rapport aux technologies déjà existantes. Pour l'éclairage, des écrans plats (les écrans LCD) existent, et ils sont même de très bonne qualité. Il faut donc que les OLED apportent une valeur ajoutée. Le **Chapitre de J.- C. Flores**

3. Structures à microcavités : N. Takada *et coll.* (1993). *Appl. Phys. Lett.*, **63** : 2032, R. H. Jordan *et coll.* (1996). *Appl. Phys. Lett.*, **69** : 1997, utilisation de microlentilles : C. F. Madigan *et coll.* (2000). *Appl. Phys. Lett.*, **76**(13) : 1650-1652, insertion d'aérogel de silice entre le verre et l'ITO : T. Tsutsui *et coll.* (2001), *Adv. Mater.*, **13**(15) : 1149-1152.

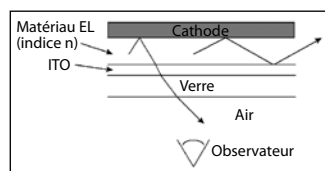


Figure 19

Chemin de l'onde lumineuse émise obtenue par effets de guidage. EL = électroluminescent.

de *Chimie et technologies de l'information* montre que le passage de la technologie LCD aux diodes électroluminescentes organiques simplifie beaucoup le dispositif et permet de gagner de la place, ce qui est un gros avantage pour l'industriel.

Les diodes électroluminescentes organiques existent déjà sur le marché ; elles sont utilisées pour les écrans, soit pour les télévisions (mais ces écrans restent encore très coûteux), soit pour les téléphones portables.

Selon les résolutions, les pixels (donc les OLED) seront soit alignés, soit mis en diagonale. Sur l'exemple de la **Figure 20**, ils sont tous mélangés de façon à augmenter la résolution : on y retrouve les trois couleurs primaires qui permettent d'avoir toutes les couleurs. Et chaque pixel est contrôlé par au minimum un transistor.

Les diodes électroluminescentes organiques sont intéressantes pour faire des écrans plats. D'une part, la différence d'épaisseur est nette par rapport aux écrans LCD, mais en outre, l'écran peut être courbe, ce qui améliore la vision comme au cinéma. Courber un écran en verre (ou un tube cathodique) est difficile voire impossible. Avec les OLED c'est possible. Cette

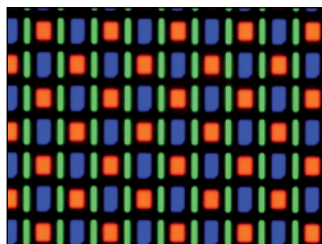


Figure 20

Photo de la répartition des pixels (Active Matrix OLED (AMOLED)).

technologie d'écran de télévision est cependant encore coûteuse (environ 10 000 \$).

En revanche, il existe un marché de niche, notamment au niveau de micro-écrans, pour lesquels on demande aussi une bonne résolution (on peut par exemple atteindre quelques millions de pixels). On retrouve ces écrans dans les viseurs de certains appareils photographiques et dans les lunettes 3D utilisées pour la réalité virtuelle. En France, la société microOLED, start-up issue des travaux du CEA, en fabrique.

Les écrans souples comme ceux représentés sur la **Figure 21** existent maintenant sur le marché. Ces écrans peuvent être tordus et même roulés dans la poche, ce qui ouvre la perspective de beaucoup de nouvelles applications et d'objets nouveaux. Des téléphones portables à écran courbes sont déjà commercialisés (**Figure 22**).

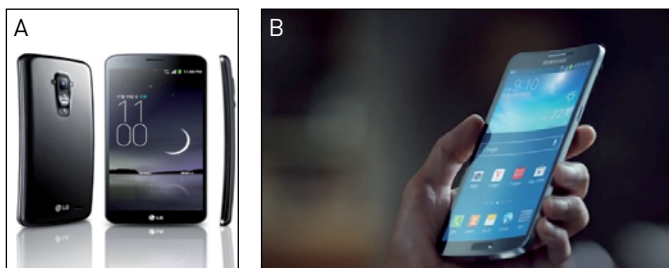
Figure 21

Exemples d'écrans souples.
Sources : udcoled et oled-info.



Figure 22

Nouveaux portables à écran courbe de LG G Flex (A) et Samsung Galaxy Round (B) en 2013.



2.4.2. L'éclairage à partir de sources plates

L'utilisation des OLED pour l'éclairage s'est beaucoup développée. Jusqu'à récemment, la lumière pouvait être émise soit par des points dans le cas des diodes électroluminescentes, soit par des tubes, ou soit par des ampoules. À présent, elle peut être émise par des surfaces. La société française Astron Fiamm commercialise des diodes électroluminescentes pour cette technologie d'éclairage à partir de sources plates. Des designers peuvent, à partir de ce type de sources, concevoir quantités d'objets nouveaux

au niveau des applications comme de l'esthétique

De même que pour l'application aux écrans, les sources plates de lumière OLED peuvent être aussi flexibles (Figure 23) et conduire à des utilisations appréciées par les designers et les architectes. Ces sources ne sont pas éblouissantes et peuvent prendre toutes les formes possibles, y compris servir de rideau lumineux. Ces sources lumineuses flexibles sortent à peine des laboratoires, mais on peut prévoir que leurs applications seront nombreuses et se développeront rapidement.



Figure 23

Source OLED plate et souple pour éclairage flexible.

Source : LGChem

L'avenir des diodes électroluminescentes organiques, entre les mains des chimistes qui savent rêver !

Tous ces exemples montrent que les possibilités d'évolution des diodes électroluminescentes organiques, aussi bien dans la qualité de leurs propriétés que dans leurs domaines d'applications, sont immenses et dépendront beaucoup du savoir-faire et de l'imagination des chimistes.

Cela suggère une belle phrase d'Oscar Wilde selon laquelle la sagesse consisterait à avoir des rêves qui soient les plus grands possibles, de façon à ne jamais les perdre de vue quand on s'en approche :

« *Wisdom is to have dreams that are big enough not to lose sight when we pursue them* », Oscar Wilde.