



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEN**

# MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

**MASTER EN PHYSIQUE**

Spécialité : Physique Energétique et Energie renouvelables

Par :

**Mr Tahir Youssouf**

Sur le thème

---

## Etude et Simulation des propriétés électriques et optiques des cellules organiques OLED (Tandem et Bulk)

---

Soutenu le 14 Juillet 2021 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mr CHABANE SARI Nasr-Eddine	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mme BOUCHAOUR Mama	MCB	ESSA de Tlemcen	Encadrante
Mr CHIALI Anisse	MCB	ESSA de Tlemcen	Co-encadreur
Mr MERAD Laarej	Professeur	Université de Tlemcen	Examinateur
Mme BACHIR Nadia	MCB	Université de Tlemcen	Examinatrice

*Années universitaires :2020 ~ 2021*

# *Remerciements*

Le travail présenté dans ce projet de fin d'étude a été réalisé à l'unité de recherche des matériaux et énergies renouvelables (URMER), département de physique, faculté des sciences l'université de Tlemcen.

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude à **Madame BOUCHAOUR Mama**, Maître de Conférences de l'université de Tlemcen, Directrice de ce mémoire de master. J'ai pu bénéficier de sa grande expérience scientifique, de sa constante disponibilité ainsi que de sa patience.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à **Monsieur CHIALI Anisse**, Maître de Conférences à ESSA de Tlemcen, Co-directeur de ce mémoire de master, pour son soutien scientifique et pédagogique ainsi que pour ses encouragements tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Je remercie vivement, **Monsieur CHABANE SARI Nasr-Eddine**, professeur à l'Université de Tlemcen pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury.

J'exprime mes remerciements à **Monsieur MERAD Laarej**, professeur à l'Université de Tlemcen et **Madame BACHIR Nadia**, Maître de conférences à l'Université de Tlemcen d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mon cher père et ma chère mère, mon premier soutien dans cette vie, je n'oublierai jamais leur amour, leur dévouement, leur sacrifice et leur motivation constante qui me poussent toujours vers l'avant.*

*Ma chère sœur Amina et mon cher frère Mohammed Riyadh, ils m'ont accompagné depuis que je suis jeune et ont fait de nombreux sacrifices pour moi, et ils sont mon deuxième soutien dans la vie après mes parents. Je n'oublierai jamais leur sacrifice et leur soutien pour moi.*

## *Table des matières*

Remerciements .....	II
Dédicace.....	III
Sommaire.....	IV
Liste des figures.....	VIII
Liste des tableaux.....	XII
Liste des abréviations .....	XIII
Introduction générale.....	2
 <b>Chapitre I : Généralités sur les diodes électroluminescentes organiques OLED</b>	
I.1 Introduction.....	5
I.2 L'électronique organique flexible .....	5
I.2.1 Définition .....	5
I.2.2 Sous-parties de structures électroniques flexibles.....	6
I.2.2.1 Les substrats flexibles.....	6
I.2.2.2 Électronique du fond de panier.....	7
I.2.2.3 Technologies du plan frontal .....	7
I.2.2.4 Encapsulation.....	8
I.3 Les matériaux organiques .....	8
I.3.1 Les semi-conducteurs organiques.....	8
I.3.1.1 Définition.....	8
I.3.1.2 Types de semi-conducteurs organiques .....	8
I.3.1.3 Caractère de semi-conducteurs organiques.....	9
I.3.1.4 $\pi$ -conjugaison.....	10

I.3.1.5 Les niveaux d'énergies HOMO/ LUMO.....	11
I.3.1.6 Les polarons .....	12
I.3.1.7 Les excitons.....	13
I.3.1.8 Transport de charges .....	14
I.4 Les diodes électroluminescentes organiques OLED.....	15
I.4.1 Historique.....	16
I.5 Application OLED.....	21
I.5.1 Domaine médical.....	21
I.5.2 Domaine en militaire.....	22
I.5.3 Domaine photovoltaïque .....	24
I.5.3.1 Cellules solaire organique OPV.....	24
I.5.3.2 Appareil OPV-OLED double mode avec photovoltaïque électroluminescent fonctionnalités .....	24
I.6 Avantages de la technologie OLED .....	26
I.7 Inconvénients de la technologie OLED.....	27
I.8 Différence entre LCD et OLED .....	27
I.9 Conclusion.....	28

## **Chapitre II : Etat de l'art des Diodes électroluminescentes organiques**

II.1 Introduction .....	30
II.2 Électroluminescence principe de base .....	30
II.3 Structure d'une diode électroluminescente organique .....	30
II.3.1 Structure monocouche (OLED Bulk) .....	31
II.3.2 Structure bicouche : simple hétéro jonction .....	31
II.3.3 Structures multicouches .....	32
II.4 Principe de fonctionnement des OLEDs.....	33
II.4.1 Injection des charges.....	33
II.4.2 Transport des électrons.....	34

II.4.3 Transport des trous.....	34
II.4.4 Recombinaison des porteurs de charges.....	34
II.4.5 Désexcitation .....	35
II.5 Caractérisation d'une OLED.....	35
II.5.1 Caractérisation électrique.....	35
II.5.1.1 Courbes courant-tension-luminance « I-V-L » .....	35
II.5.1.2 Spectre électroluminescent EL .....	36
II.5.1.3 Rendements.....	36
II.6 Les types OLED.....	38
II.6.1 OLED Tandem .....	38
II.6.2 TOLEDs (Transparent OLEDs) .....	40
II.6.3 OLED à matrice passive (PMOLED) .....	41
II.6.4 OLED à matrice active (AMOLED) .....	42
II.6.5 OLED flexibles (FOLED) .....	43
II.7 Avenir des OLED.....	44
II.8 Différentes couches du dispositifs OLEDs.....	45
II.8.1 Couche d'injection de trous (Hole Injection Layer HIL) .....	45
II.8.2 Couche émettrice (Electroluminescent Layer EL) .....	45
II.8.3 Couche de transport des porteurs de charges.....	45
II.8.4 Couche bloquante de porteurs de charges.....	46
II.8.5 Choix des électrodes .....	46
II.8.5.1 Anode.....	46
II.8.5.2 Cathode.....	47
III.7.2.1 Matériaux pour OLED (Tandem et Bulk) .....	47
II.9 Synthèse d'OLED.....	50
II.9.1 Gravure de l'ITO.....	50
II.9.2 Dépôt des couches organiques .....	51

II.9.2.1 Spin coating .....	51
II.9.2.2 Dépôt par évaporation sous vide .....	51
II.9.3 Dépôt de la cathode .....	52
III.3 À propos de GPVDM.....	53
III.3.1 Fenêtre de l'éditeur de couches (Layer Editor) .....	54
III.3.2 Premier simulation de GPVDM.....	54
III.3.3 Modification des paramètres électriques d'un matériau.....	55
III.3.4 Types de couches dans GPVDM.....	55
III.4 Simulation des OFET et d'autres structures 2D .....	56
III.5 Simulation de dispositifs pérovskites.....	57
III.6 Modélisation des diodes électroluminescentes organiques OLED.....	58
III.7 Etude des propriétés optiques et électriques .....	60
III.7.1 Simulation des dispositifs OLED (Tandem et Bulk) .....	60
II.10 Conclusion .....	62

### **Chapitre III : Simulation des propriétés optiques et électriques des diodes électroluminescentes organiques OLED**

III.1 Introduction.....	64
III.7.2 Résultats et discussions.....	65
III.7.2.2 Propriétés électriques.....	66
III.8 Influence de l'épaisseur de couche émissive sur la performance d'OLED .....	71
III.8.1 Dispositif étudié .....	71
III.8.2 Propriétés électriques.....	74
III.9 Propriétés optiques.....	78
III.9.1 Influence de l'anode sur la performance d'OLED.....	78
III.9.2 Influence de la cathode sur la performance d'OLED.....	80
III.10 Conclusion .....	82
Conclusion générale.....	84

Perspective.....	84
------------------	----

## *Liste des figures*

### **Chapitre I : Généralités sur les diodes électroluminescentes organiques OLED**

<b>Figure I.1</b> : Représentation de l'hybridation $sp_2$ de l'atome de carbone.....	9
<b>Figure I.2</b> : Origine de la double liaison du carbone et hybridation des orbitales moléculaires en trois orbitales hybrides s p .....	10
<b>Figure I.3</b> : Formules chimiques de l'éthylène (nom usuel de l'éthène) .....	11
<b>Figure I.4</b> : Représentation des niveaux d'énergie HOMO/ LUMO.....	12
<b>Figure I.5</b> : Etat électronique localisé d'un polaron.....	13
<b>Figure I.6</b> : Évolution de la technologie OLED au cours du temps.....	16
<b>Figure I.7</b> : Hétérostructure de l'OLED .....	17
<b>Figure I.8</b> : Schéma d'une pile OLED à émission par le bas typique (a) et mécanisme d'émission (b) OLED dopées fluorescentes (c) OLED dopées phosphorescentes .....	18
<b>Figure I.9</b> : Couches PHOLED.....	19
<b>Figure I.10</b> : Structure chimique de l'émetteur phosphorescent $Ir(MDQ)_2(acac)$ .....	20
<b>Figure I.11</b> : Diagramme du processus de TADF.....	20
<b>Figure I.12</b> : Affichage pour les écrans plats (OLED-LCD) .....	21
<b>Figure I.13</b> : Etudes de cytocompatibilité des (OLED).....	22
<b>Figure I.14</b> : Equipements du combattant du futur.....	23
<b>Figure I.15</b> : Schéma d'une cellule solaire organique.....	24
<b>Figure I.16</b> : Structures de l'OPV-OLED bimode et de ses constituants chimiques.....	25

### **Chapitre II : Etat de l'art des Diodes électroluminescentes organiques**

<b>Figure II.1</b> : Étapes de base de l'électroluminescence.....	30
<b>Figure II.2</b> : Structure d'une diode monocouche.....	31
<b>Figure II.3</b> : Structure de base d'OLED.....	32

<b>Figure II.4</b> : Diagramme schématique de la structure multicouche d'un OLED.....	33
<b>Figure II.5</b> : Schéma du principe de fonctionnement d'une OLED monocouche.....	34
<b>Figure II.6</b> : Schéma simplifié de fonctionnement d'une OLED.....	35
<b>Figure II.7</b> : Courbe I-V-L (courant-tension-luminance) .....	36
<b>Figure II.8</b> : Différentes types d'architecture WOLED en Tandem.....	39
<b>Figure II.9</b> : Affichage d'écran TOLED.....	40
<b>Figure II.10</b> : Structure TOLED.....	41
<b>Figure II.11</b> : Structure OLED à matrice passive (PMOLED) .....	42
<b>Figure II.12</b> : Structure Active-matrix OLED (AMOLED) .....	43
<b>Figure II.13</b> : Structure OLED flexibles (FOLED) .....	44
<b>Figure II.14</b> : Affichage des informations sur la voiture.....	45
<b>Figure II.15</b> : Visionox : prototype OLED flexible.....	45
<b>Figure II.16</b> : Structure chimique du tris-(8-hydroxyquinoléine) aluminium (Alq3) .....	47
<b>Figure II.17</b> : Structure chimique du tris(2-phénylpyridine) iridium [Ir(ppy)3] .....	48
<b>Figure II.18</b> : Structure chimique du 4,4'-bis(N-carbazolyl) -1,1'-biphényle (CBP) .....	48
<b>Figure II.19</b> : Structure chimique du 3-(Biphényl-4-yl) -5-(4-tert-butylphényl) -4-phényl-4H-1,2,4-triazole (TAZ) .....	49
<b>Figure II.20</b> : Structure chimique du N, N, N', N'-Tetrakis(3-méthylphényl) -3,3'-diméthylbenzidine (HMTPD) .....	49
<b>Figure II.21</b> : Intérêt de la gravure de la couche d'ITO.....	50
<b>Figure II.22</b> : Illustration d'un dépôt par enduction centrifuge (ou spin coating) .....	51
<b>Figure II.23</b> : A) Bâti d'évaporation sous vide. B) Photos des différents creusets utilisés pour évaporer les métaux et les molécules organiques. C) Echantillon terminé. La zone d'ITO gravée et visible sur la partie supérieure.....	52
<b>Figure II.24</b> : Masque pour le dépôt de la cathode.....	52
<b>Figure II.25</b> : Interface GPVDM.....	53
<b>Figure II.26</b> : Fenêtre de l'éditeur de couches (Layer Editor) .....	53
<b>Figure II.27</b> : Première simulation GPVDM.....	54

<b>Figure II.28</b> : Fenêtre de paramètres électriques des couches actives.....	54
<b>Figure II.29</b> : Simulation OFET (transistor à effet de champ organique) .....	56
<b>Figure II.30</b> : Simulation de dispositifs pérovskites.....	56
<b>Figure II.31</b> : Dispositif OLED Bulk par GPVDM.....	61
<b>Figure II.32</b> : Structure d’OLED Tandem par GPVDM.....	62

### **Chapitre III : Modélisation et simulation des propriétés optiques et électriques des OLEDs (OLED)**

<b>Figure III.1</b> : Résultats de simulation OLED Bulk.....	64
<b>Figure III.2</b> : Résultats de simulation OLED Tandem.....	64
<b>Figure III.3</b> : caractéristiques I-V d’OLED Bulk.....	65
<b>Figure III.4</b> : caractéristiques I-V d’OLED Tandem.....	65
<b>Figure III.5</b> : caractéristiques J-V d’OLED Bulk.....	66
<b>Figure III.6</b> : Caractéristiques J-V d’OLED Tandem.....	67
<b>Figure III.7</b> : Caractéristiques L-J d’OLED Bulk.....	67
<b>Figure III.8</b> : Caractéristiques L-J d’OLED Tandem.....	68
<b>Figure III.9</b> : Caractéristiques L-V d’OLED Bulk.....	68
<b>Figure III.10</b> : Caractéristiques L-V d’OLED Tandem.....	69
<b>Figure III.11</b> : Emission de lumière pour une épaisseur de 10 nm.....	70
<b>Figure III.12</b> : Emission de lumière pour une épaisseur de 60 nm.....	70
<b>Figure III.13</b> : Emission de lumière pour une épaisseur de 150 nm.....	70
<b>Figure III.14</b> : Caractéristiques I-V (épaisseur de 10 nm) .....	71
<b>Figure III.15</b> : Caractéristiques I-V (épaisseur de 60 nm) .....	71
<b>Figure III.16</b> : Caractéristiques I-V (épaisseur de 150 nm) .....	71
<b>Figure III.17</b> : Caractéristiques J-V (épaisseur de 10 nm) .....	72
<b>Figure III.18</b> : Caractéristiques J-V (épaisseur de 60 nm) .....	72
<b>Figure III.19</b> : Caractéristiques J-V (épaisseur de 150 nm) .....	73

<b>Figure III.20</b> : Caractéristiques L-V (épaisseur de 10 nm) .....	73
<b>Figure III.21</b> : Caractéristiques L-V (épaisseur de 60 nm) .....	74
<b>Figure III.22</b> : Caractéristiques L-V (épaisseur de 150 nm) .....	74
<b>Figure III.23</b> : Caractéristiques L-J (épaisseur de 10 nm) .....	75
<b>Figure III.24</b> : Caractéristiques L-J (épaisseur de 60 nm) .....	75
<b>Figure III.25</b> : Caractéristiques L-J (épaisseur de 150 nm) .....	75
<b>Figure III.26</b> : Distribution de photons à travers l'OLED Bulk à base d'anode ITO.....	76
<b>Figure III.27</b> : Distribution de photons à travers l'OLED Bulk à base d'anode ZnO.....	76
<b>Figure III.28</b> : Densité de photons à travers l'OLED Bulk à base d'anode ITO.....	77
<b>Figure III.29</b> : Densité de photons à travers l'OLED Bulk à base d'anode ZnO.....	77
<b>Figure III.30</b> : Taux de génération de photons à travers l'OLED Bulk à base d'anode ITO.. .....	78
<b>Figure III.31</b> : Taux de génération de photons à travers l'OLED Bulk à base d'anode ZnO. ....	78
<b>Figure III.32</b> : Distribution de photons à travers l'OLED Bulk à base de cathode Al .....	79
<b>Figure III.33</b> : Distribution de photons à travers l'OLED Bulk à base de cathode Au.....	79
<b>Figure III.34</b> : Densité de photons à travers l'OLED Bulk à base de cathode Al.....	80
<b>Figure III.35</b> : Densité de photons à travers l'OLED Bulk à base de cathode Au.....	80
<b>Figure III.36</b> : Taux de génération de photons à travers l'OLED Bulk à base de cathode Al.....	81
<b>Figure III.37</b> : Taux de génération de photons à travers l'OLED Bulk à base de cathode Au.....	81

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau II.1</b> Type de calque, description, et la résolution optoélectronique des calques...	55
<b>Tableau II.2</b> : Différentes calques d'OLED Bulk.....	60
<b>Tableau II.2</b> : Différentes calques d'OLED Tandem.....	61

## *Listes des abréviations*

OLED : Organic Light Emitting Diode (Diode électroluminescente organique)

TCO : Oxyde Transparents Conducteur (Oxyde Transparents Conducteur)

LED : Light Emitting Diode (Diode électroluminescente)

OFET : Organic Field Effect Transistors (Transistors organiques à effet de champ)

GPVDM : Général-Propose Photovoltaic Device Model (Modèle de dispositif photovoltaïque Général-Propose)

LCD : Ecrans à cristaux liquides

SCO : Semi-Conducteur organique

HOMO : Highest Occupied Molecular Orbital (Orbitale moléculaire la plus Haute Occupée)

LUMO : Lowest Unoccupied Molecular Orbital (Orbitale moléculaire la plus Basse Vacante)

SC : Semi-Conducteur

Alq<sub>3</sub> : Le tris(8-hydroxyquinoléine) aluminium(III)

RQE : Rendement quantique externe

DCM1 : Emetteur rouge à haut rendement quantique

EQE : Efficacité quantique externe

EML : Couches émissive

PHOLED : Diodes phosphorescentes

UDC : Universal Display Corporation

Ir(MDQ)<sub>2</sub> (acac) : Emetteur à base d'iridium

TADF : Thermally activated delayed fluorescence (Fluorescence retardée activée thermiquement)

RISC : Reverse inter system crossing (Traversée inter-systèmes inversée)

OPV : Cellules solaire organique

ZR : Zone de recombinaison

HIL : Couches d'injection des trous

EIL : Couches d'injection des électrons  
HTL : Couches de transport des trous  
ETL : Couche de transport des électrons  
HBL : Couche pour le blocage des trous  
EBL : Couche pour le blocage des électrons  
I-V-L : Courbes courant-tension-luminance  
RQI : Rendement quantique interne  
CGL : Couches de génération de charge  
EL : Spectres d'électroluminescence  
WOLED : White Organic Light Emitting Diode (Diode électroluminescente organique blanche)  
TOLED : OLED transparents  
ITO : Oxyde d'indium-étain  
LiF : Fluorure de lithium  
Al : Aluminium  
Ag : Argon  
PMOLED : OLED à matrice passive  
AMOLED : OLED à matrice active  
TFT : Transistors à couche mince  
FOLED : OLED flexibles  
UCD : Universal Communication Device (Dispositif de communication universel)  
Ir(ppy)<sub>3</sub> : Tris(2-phénylpyridine) iridium(III)  
BCP : 4,4'-Bis(N-carbazolyl)-1,1'-biphényle  
TAZ : 3-(biphényl-4-yl)-5-(4-tertbutylphényl)-4-phényl-4H-1,2,4-triazole  
HMTPD : N, N, N', N'-Tetrakis(3-méthylphényl)-3,3'-diméthylbenzidine  
Ca : Calcium  
SRH : Shockley-Read-Hall  
ZnO : Oxyde de zinc, Au : Or

# **Introduction générale**

L'énergie a été depuis l'antiquité le moteur de l'activité humaine, elle joue un rôle très important dans la vie quotidienne et dans le développement des nations. La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir.

Depuis une trentaine d'années, la recherche dans le domaine de l'électronique organique a considérablement progressé en raison des applications potentielles innovantes et variées. En effet, l'électronique organique est une branche de l'électronique utilisant des composés carboniques qui possèdent des propriétés semi-conductrices. Cette thématique pluridisciplinaire comprend d'autres domaines : chimiques, physico-chimiques, physique des semi-conducteurs et des composants électroniques tels que les diodes électroluminescentes organiques (OLEDs : Organic Light Emitting Diodes), les transistors à effet de champ (OFET : Organic Field Effect Transistors), les cellules solaires organiques et les capteurs organiques [1].

Dans le cas, OLEDs, leur l'évolution n'a cessé d'augmenter. Leurs performances ont été optimisées en peu de temps, si bien que les OLEDs blanches concurrençaient déjà l'éclairage par incandescence et halogène au début des années 2000 [3]. De nos jours, des panneaux lumineux de grande taille pour l'éclairage de bureau ont vu le jour et prennent le pas sur les LEDs pour certaines applications. Cependant, c'est dans le domaine de l'affichage que les OLEDs ont connu leur plus grand essor. Des technologies hybrides (silicium-organique), associant des OLEDs et transistors à effet de champ, sont maintenant commercialisées, et utilisées dans de nombreuses applications usuelles telles que des écrans de télévision incurvés (Sony, LG, ...) ou encore des écrans de téléphones (Samsung). De plus, des écrans pliables performants sont à l'étude pour de futures commercialisations, ainsi que l'intégration d'écrans transparents dans les vitrages [2].

On distingue deux types de procédés possibles pour obtenir de l'électroluminescence organique : soit à partir des polymères, soit à partir des molécules de faible poids moléculaire, communément appelées « petites molécules ». Les premiers sont étalés par spin-coating à partir d'une solution, alors que les petites molécules sont évaporées thermiquement sous vide. En fonction du type de substrat (plastique ou verre). En fonction de l'application, on utilise l'une ou l'autre technique [4].

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude et la simulation des propriétés électriques et optiques des OLEDs. Le manuscrit est organisé et structuré en trois chapitres : Dans le premier chapitre, nous donnons des notions générales sur les cellules OLEDs. Dans le deuxième chapitre, nous présenterons un état de l'art sur les cellules OLED. Quant au dernier chapitre, nous exposerons les résultats obtenus lors de la simulation des cellules OLED par le simulateur GPVDM. Nous discuterons le comportement et les performances des OLED ainsi que l'effet de l'épaisseur de la couche émissive et la couche TCO sur le rendement de la cellule OLED.

---

[1] Bouchra BOULESBAA, « Étude de l'effet des caractéristiques de la couche TCO sur les propriétés de la cellule PV en silicium », mémoire de master, Jijel, 2019.

## *Introduction générale*

---

[2] Benoît Blondel, "Complexes de platine (II) pour des diodes organiques électroluminescentes (OLEDs) rouges et bistables", Thèse, Toulouse, 2017.

[3] Khaoula BENATIA " Etude des propriétés électriques et optiques des diodes électroluminescentes organiques « OLED » a base de films minces en polymère", Thèse, Constantine 1, 2018

[4] H. Choukri, "Contrôle de la couleur d ' émission d ' une Diode Electro-Luminescente Organique ( OLED ) multicouche via la diffusion des excitons" , Thèse Paris 13 ,2008.

[5] <https://fr.mathworks.com/company/aboutus.html>

**Chapitre I**

**Généralités sur les diodes  
électroluminescentes organiques  
OLED**

## **I.1 Introduction :**

De nos jours, les écrans plats connaissent un succès considérable auprès du public. La technologie actuelle est dominée par les écrans à cristaux liquides (LCD) et ceux à plasma. Mais déjà, une nouvelle technologie émerge, utilisant des diodes électroluminescentes (OLED) à base de matériaux organiques. Ces dispositifs possèdent les propriétés classiques des matières plastiques (élasticité, ductilité, résistance à la rupture...), permettant ainsi d'obtenir des écrans extra-plats et souples. Les domaines d'utilisation de cette nouvelle technologie sont nombreux (téléphone portable, ordinateur, télévision...). Mais le domaine d'application des OLED ne se limite pas à l'affichage. En effet, les OLED ont l'avantage de consommer peu d'énergie tout en développant une forte luminance. Très récemment, il a donc été envisagé de fabriquer des OLED émettant une lumière blanche afin de supplanter les ampoules traditionnelles et autres néons actuels [1].

Une OLED est la version organique des diodes électroluminescente (DEL) ou « LED » en anglais. Elle est dite organique, car ses constituantes actives sont à base de chaînes de carbone. Telle que son nom indique, une OLED est une diode et si un courant électrique passe de la cathode à l'anode, elle va émettre de la lumière. Il est important de mentionner que cette lumière émise peut être dans le visible tel que la lumière du soleil ou dans le non visible comme les infrarouges. Elle peut émettre donc, de la lumière qui est perceptible ou non par l'œil humain. La principale différence entre une OLED et une LED est que les matériaux de l'OLED permettent de fabriquer des écrans et des solutions d'éclairage mince. Contrairement à ceux des LEDs, les matériaux des OLED peuvent être translucides et sont déposables en couches minces [2].

## **I.2 L'électronique organique flexible :**

### **I.2.1 Définition :**

L'intérêt pour l'électronique flexible augmente car elle apporte des fonctionnalités supplémentaires et une valeur esthétique aux interfaces non conventionnelles (telles que les systèmes de surveillance biologique, les appareils portables, les textiles flexibles, les technologies à base de papier et de nombreux autres schémas flexibles).

L'électronique flexible est une technologie naissante, avec un fort potentiel économique à faible coût. Leur domaine de développement touche les circuits flexibles, les panneaux photovoltaïques organiques ou bien les nouvelles technologies d'affichage. Sa haute performance par rapport à son faible coût en fait un point fort.

### **I.2.2 Sous-parties de structures électroniques flexibles**

La structure électronique flexible est constituée de :

- Un substrat
- Électronique du fond de panier
- Électronique du plan avant
- Encapsulation [3].

Pour créer une structure flexible, tous ses composants doivent être flexibles dans une certaine mesure sans perdre leur fonctionnement de base [3].

Il existe deux méthodes de base pour rendre les appareils électroniques flexibles :

- **Transfert et le collage du circuit sur le substrat flexible :**

Dans le procédé de transfert et de collage, selon les procédés standards, la structure entière est fabriquée sur un substrat porteur tel qu'une tranche de silicium ou une plaque de verre, puis transférée sur un substrat flexible.

- **Électroniques flexibles fabriquées directement sur un substrat flexible :**

Contrairement au concept de dispositif électronique fixé sur un substrat flexible, le dispositif électronique est fabriqué directement sur le substrat flexible. Ce concept implique de nouvelles restrictions sur les procédures de fabrication existantes. La contrainte la plus sévère est la limitation de la température de processus imposée au substrat, sans oublier la flexibilité mécanique du système qui endommagera la couche active. Le concept d'électronique flexible nécessite l'utilisation d'autres technologies de fabrication répondant à ces contraintes. L'avantage de fabriquer des dispositifs électroniques directement sur des substrats flexibles est que les coûts de fabrication peuvent être réduits grâce à une production plus rapide sur une plus grande surface.

### **I.2.2.1 Les substrats flexibles :**

Le choix du type de substrat dépend de la nature de l'application. En effet, certaines applications telles que les écrans ont besoin d'une transparence élevée du substrat. Les écrans LCD ont en plus besoin d'une biréfringence minimale. La pureté du substrat est aussi exigée, il est important que le substrat ne contamine pas l'électronique fabriquée et ne réagisse pas avec les solutions chimiques utilisées lors du processus de fabrication [4].

Généralement, le succès d'une électronique flexible sur un tel substrat impose des critères de base sur le film. Ces critères sont les suivants [4]:

- La température maximale du processus.
- Le faible pourcentage de déformation.
- La clarté.
- La résistance aux solvants.
- La résistance à l'humidité.
- La faible rugosité.

### **I.2.2.2 Électronique du fond de panier :**

Le fond de panier est le câblage des câbles du module dans le plateau du rack de plaques, qui est généralement effectué sur la carte imprimée. Il comprend généralement le circuit de communication entre le bus d'alimentation et la carte. Par exemple, lorsque tous les modules traitent en continu des signaux, le fond de panier connectera les broches de sortie d'un emplacement aux broches d'entrée de l'emplacement suivant. Le fond de panier du dispositif numérique peut comprendre un bus informatique.

### **1.2.2.3 Technologies du plan frontal[3]:**

L'électronique du plan avant porte le dispositif optoélectronique tel que :

- Écrans à cristaux liquides
- Affichages électrophorétiques
- Écrans électroluminescents organiques
- Capteurs
- Actionneurs
- Textiles électroniques.

### **1.2.2.4 Encapsulation [5]:**

L'encapsulation a pour but d'assurer la protection, la compatibilité et la stabilisation d'une matière active dans une formulation. Elle permet d'améliorer la présentation d'un produit ou encore de masquer une odeur ou un goût. Elle peut également modifier et contrôler le profil de libération d'une substance active pour obtenir, par exemple, un effet prolongé ou déclenché.

## **I.3 Les matériaux organiques :**

On distingue deux types de matériaux organiques :

- Les matériaux organiques isolants (non conjugués) : qui possèdent une énergie de gap très importante, et la présence des simples liaisons.
- Les matériaux organiques conjugués : possédant une faible énergie de gap, et ils se caractérisent par de simple (C-C) et double (C=C) liaisons. Ces matériaux possèdent les caractéristiques de semi-conducteur organique (SCO).

### **I.3.1 Les semi-conducteurs organiques :**

#### **1.3.1.1 Définition [6] :**

Un semi-conducteur organique est un composé organique, sous la forme d'un cristal ou d'un polymère. Il montre des propriétés similaires au semi-conducteur inorganique.

Ses propriétés sont la conduction par les électrons et les trous, ainsi que la présence d'une bande interdite. Ces matériaux ont donné naissance à l'électronique organique. Ou électronique des plastiques par organique. On entend que les molécules utilisées sont à base de carbone comme les molécules à la base de la vie.

On dit organique par opposition aux semi-conducteurs inorganiques, tels le silicium ou aux conducteurs inorganiques, comme le cuivre.

#### **1.3.1.2 Types de semi-conducteurs organiques :**

Il existe deux types de semi-conducteurs organiques : les polymères macromoléculaires et les petites molécules.

- Un polymère [5] est une macromolécule dont la structure se répète régulièrement en de longues chaînes constituées d'entités élémentaires : les monomères. Les petites molécules regroupent des oligomères qui ne sont constitués que d'un ou quelques monomères. Leur fonctionnement est identique mais les méthodes de synthèse diffèrent.
- Les petites molécules [7], d'une part leur faible masse moléculaire (< 1000 g/mol), sont généralement déposées par évaporation sous vide. Le contrôle des conditions de dépôt, telles que la température du substrat et la vitesse d'évaporation, permet d'obtenir des films minces relativement ordonnés facilitant le transfert intermoléculaire des charges.

### 1.3.1.3 Caractère des semi-conducteurs organiques :

Contrairement aux semi-conducteur inorganiques [8], les semi-conducteurs organiques se présentent sous forme de chaînes carbonées de type  $\pi$ -conjugués caractérisées par une alternance de liaisons simples et doubles dans leur structure chimique. L'alternance des liaisons simples et doubles, de type  $\sigma$  et  $\pi$ , confère à ces matériaux deux propriétés confirmant leur large potentiel d'utilisation. En effet, de la délocalisation des électrons des liaisons  $\pi$  découlent des propriétés de transport électrique et des propriétés optiques intéressantes. L'écart énergétique des bandes  $\pi$  et  $\pi^*$  varie de 1.5 eV à 3 eV couvrant ainsi idéalement le domaine optique.

Intrinsèquement, les semi-conducteur  $\pi$ -conjugués sont isolants, comme pour les semi-conducteurs inorganiques, et leur propriété ne deviennent intéressantes qu'après dopage.

Alors que pour les semi-conducteurs inorganiques le dopage se fait par substitution. Le dopage des semi-conducteurs organiques est interstitiel ou se fait par transfert de charges. Par conséquent, après la formation de la double liaison, l'atome de carbone est entouré de trois orbitales hybrides  $sp^2$  et d'une orbitale  $2p_z$  orientée perpendiculairement au plan formé par les orbitales  $sp^2$ . Le chevauchement latéral des orbitales  $2p_z$  de chaque atome de carbone contenant des électrons non appariés entraîne la formation d'une liaison  $\pi$  [8].

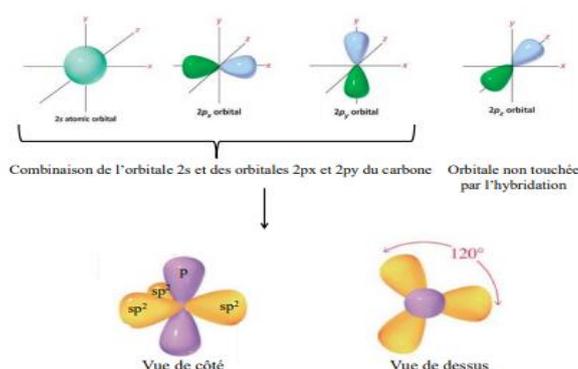
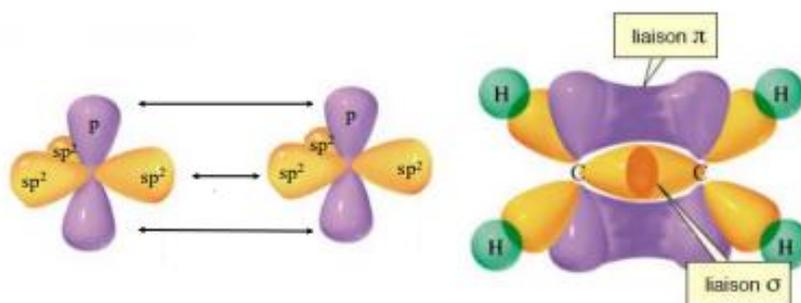


Figure I.1 : Représentation de l'hybridation  $sp^2$  de l'atome de carbone [7]

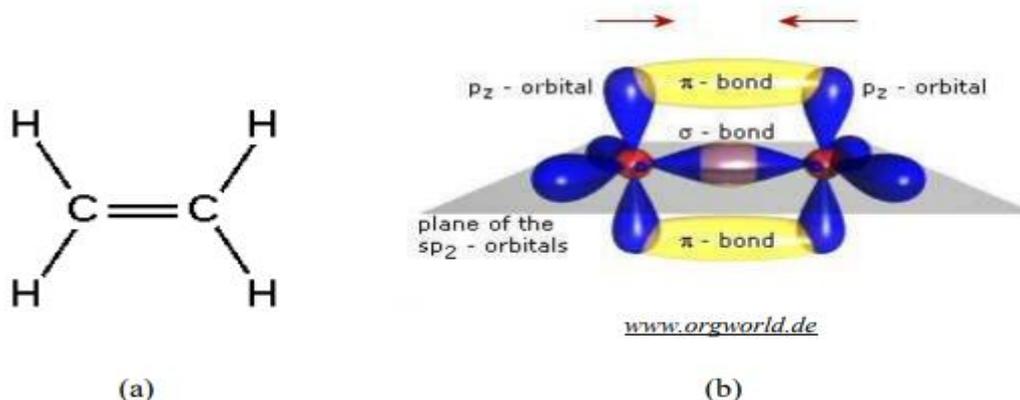


**Figure I.2 :** Origine de la double liaison du carbone et hybridation des orbitales moléculaires en trois orbitales hybrides s p [7]

### 1.3.1.4 $\pi$ -conjugaison :

✚ On prend le cas de l'éthylène  $C_2H_4$  ;

Dans cette molécule, l'atome de carbone se trouve en configuration trigonale (l'atome de carbone tétravalent ne possède que trois voisins). On distingue deux différents types de liaisons : l'une sous la désignation «  $\sigma$  » et l'autre sous la désignation «  $\pi$  ». La première liaison issue de la combinaison des orbitales atomiques hybrides  $sp^2$  constitue une liaison forte dans la molécule du composé organique lorsque deux atomes de carbone trigonaux sont liés (cas de l'éthylène). La deuxième liaison de type orbitale moléculaire  $\pi$  est le résultat de combinaisons des orbitales atomiques  $2p_z$ . On distingue alors les orbitales moléculaires  $\pi$  correspondant à l'orbitale liante occupée et les orbitales moléculaires  $\pi^*$  correspondant à l'orbitale anti-liante non occupée [9].



**Figure I.3 :** Formules chimiques de l'éthylène (nom usuel de l'éthène) ;

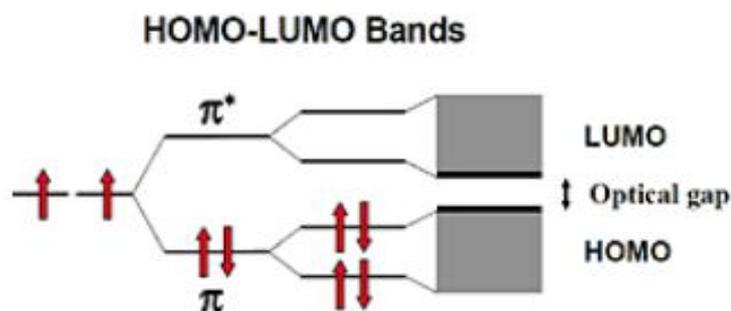
(a) représente la formule développée ; (b) donne la répartition des liaisons  $\sigma$ , des liaisons  $\pi$  (état liant occupé) et  $\pi^*$  (état anti-liant inoccupé). Les «  $\pi$  » sont perpendiculaires au plan formé par les «  $\sigma$  » [9]

Dans des systèmes conjugués, les orbitales  $\pi$  sont idéalement étendues sur la molécule complète (la " $\pi$ -orbitale moléculaire") et des nuages électroniques délocalisés sont créés. La conduction

intramoléculaire est assurée par les électrons qui peuvent circuler librement dans les recouvrements de nuages d'électrons  $\pi$ . Alors que la conduction intermoléculaire est assurée par les sauts des électrons entre les molécules grâce à une excitation électronique facile ( $\pi - \pi^*$  dans le visible) [10].

### 1.3.1.5 Les niveaux d'énergies HOMO/ LUMO :

Nous avons défini précédemment les deux types d'orbitales moléculaires ( $\pi$  et  $\pi^*$ ) mises en jeu dans le transport des SC organiques. Parmi les niveaux de celles-ci, on définit deux niveaux d'énergie les plus importants qui sont le niveau de l'orbitale occupée de plus grande énergie notée **HOMO** (pour « Highest Occupied Molecular Orbital ») et le niveau de l'orbitale inoccupée de plus basse énergie notée **LUMO** (pour « Lowest Unoccupied Molecular Orbital»). L'écart entre ces deux niveaux définit le gap qui se situe entre 2 et 3 eV typiquement dans les SC organiques électroluminescents. Ces deux niveaux HOMO et LUMO sont met en évidence dans la Figure I.4 [9].



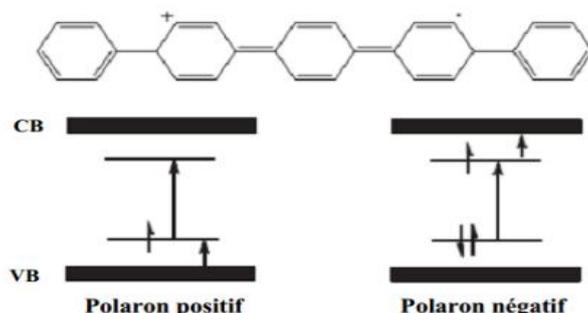
**Figure I.4** : Représentation des niveaux d'énergie HOMO/ LUMO. [10]

### 1.3.1.6 Les polarons [12] :

Le polaron (ou ion radical) est une charge positive ou négative, unique associée à une déformation locale de la chaîne polymère qui passe de la forme aromatique à la forme quinonique. Le polaron est localisé sur un nombre fini d'unités de répétition. Il présente une relation spin-charge différente de celle du soliton, il est à la fois un porteur de charge (valeur  $\pm e$ ) et un porteur de spin (valeur  $1/2$ ). Le déplacement (cohérent ou par sauts) des polarons le long du squelette de la chaîne (contribution intramoléculaire) ou entre chaînes (contribution intermoléculaire) contribue au transport électronique dans le matériau.

Les polarons sont la bonne façon de décrire les électrons et les trous dans tout conducteur matériau, mais ne sont importants que dans les solides hautement polaires ou ioniques. Les propriétés des polarons peuvent être mesurés par mesures électriques, caractérisation optique, spectroscopie Raman, photoémission, et diverses autres méthodes. Un polaron peut être «grand» ou «petit », selon la façon dont son rayon se compare à la constante de réseau. Autre que la taille, les différences les plus importantes entre les grands et les petits polarons résident dans leur transport : les grands polarons ont tendance à avoir un transport en forme de bande, tandis que les petits polarons subissent généralement transports sautillants. Deux polarons de même charge peuvent se lier à un bipolaron, et deux polarons de charge opposée peut se lier à

un exciton polaronique. Les polarons sont un domaine immensément riche et profond, à la fois théoriquement et expérimentalement, pour beaucoup plus introduction détaillée à ce domaine de recherche toujours actif [13].



**Figure I.5** : Etat électronique localisé d'un polaron [14]

### I.3.1.7 Les excitons :

Un exciton est une quasi-particule non chargée formée d'une paire électron-trou liés par interaction coulombienne. Quand un électron est excité, il passe à un niveau d'énergie plus élevé et laisse à sa place un trou qui est une particule fictive avec une charge positive, résultant de l'absence de l'électron dans cette bande. Ainsi, l'électron et le trou sont liés par une force de Coulomb. L'exciton, a une énergie légèrement inférieure à celle d'une paire électron-trou libre donnée par la somme des énergies des deux charges isolées. Cette différence est l'énergie d'interaction entre l'électron et le trou ; elle est appelée « énergie de liaison » et est de l'ordre de l'électron-volt dans les matériaux organiques [15].

Sous l'effet d'une énergie d'excitation appropriée, un électron peut transiter de l'orbitale HOMO vers l'orbitale LUMO et former un exciton (paire électron-trou liée). L'exciton ainsi formé est selon les cas dans un état singulet ou dans un état triplet. L'état singulet correspond à la configuration dans laquelle l'électron excité est de spin opposé à l'électron apparié situé sur le niveau fondamental, ce qu'on représente par  $\uparrow\downarrow$ . L'état triplet correspond à une configuration dans laquelle le spin de l'électron excité est parallèle à celui l'électron avec lequel il était apparié à l'état fondamental ; il est représenté par  $\uparrow\uparrow$  [16].

### I.3.1.8 Transport de charges :

#### a) Transport par bande

La délocalisation de porteurs de charge dépend de la liaison intermoléculaire et de l'intégrale de recouvrement entre les molécules. Dans un système fortement délocalisé, la faible interaction intermoléculaire conduit à une bande passante étroite. En théorie, dans ce cas, la mobilité des charges  $\mu_b$ , dépend de l'intégrale de recouvrement, de la distance intermoléculaire et de la température. Elle est donnée par la relation suivante [10]:

$$\mu = \frac{q\lambda}{KT} \cdot \frac{Ja}{h} \quad (\text{I.1})$$

Où  $q$  est la charge élémentaire,  $\lambda$  est le libre parcours moyen,  $K$  est la constante de Boltzmann,  $T$  est la température,  $J$  est l'intégrale de recouvrement entre les molécules,  $a$  est la distance intermoléculaire et  $\hbar$  est la constante de Planck réduite.

### **b) Sauts entre états localisés :**

Dans les semi-conducteurs inorganiques, les électrons de la bande de conduction se déplacent comme des électrons quasi libres à travers des états délocalisés. Le transport des charges est limité par les vibrations du réseau qui augmentent avec la température et qui provoquent la diffusion des porteurs [17].

Ce modèle ne peut pas être appliqué au cas des semi-conducteurs organiques pour lesquels les polarons sont localisés. Le transport de charges d'un site à un autre s'effectue en fait par effet tunnel assisté thermiquement : les porteurs se déplacent par saut (hopping) d'un état à un état voisin. Le hopping assisté thermiquement, contrairement au transport par bandes, est donc favorisé par la présence de phonons et la mobilité augmente avec la température [17].

### **c) Mobilité :**

La mobilité est un point faible majeur de l'électronique organique. L'Alq3 exhibe une mobilité des électrons de  $10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/Vs. Le pentacène a une mobilité des trous supérieure à  $1.5$  cm<sup>2</sup>/Vs. Cette dernière est équivalente à celle de silicium amorphe mais reste loin des performances du polysilicium  $50-100$  cm<sup>2</sup>/Vs ou du silicium cristallin  $300-900$  cm<sup>2</sup>/Vs. C'est le saut entre chaînes qui est en majorité responsable des faibles mobilités observées. Les liaisons intermoléculaires sont plus faibles (principalement dues aux forces de Van-de-Waals) et plus longues qu'à l'intérieur des molécules. Or, ces deux facteurs influencent de façon néfaste le hopping. Ainsi, les composants en petites molécules peuvent atteindre des mobilités jusqu'à deux ordres de grandeur supérieurs par rapport aux polymères. Quant à ces derniers, ils ne sont malheureusement jamais tout à fait à l'état cristallin : ce sont des mélanges de zones cristallines et amorphes [17].

## **I.4 Les diodes électroluminescentes organiques OLED :**

### **I.4.1 Historique**

L'histoire de la physique des semi-conducteurs commence en 1833 avec M. Faraday qui remarque que le pouvoir conducteur de certains matériaux augmente avec la température, contrairement à ce qui se passe habituellement pour les métaux. Mais c'est en 1931 que K. G. Wilson jeta les bases de la théorie moderne des semi-conducteurs comme des isolants à faible bande interdite et introduisit la notion de trou. Trente ans plus tard, Nick Holonyak Jr. est le premier à avoir créé une diode à spectre visible (LED en anglais), dont le principe de fonctionnement est basé sur une jonction PN [18].

A terme, les chercheurs pensent aboutir à un rendement de l'ordre de  $300$  Lm/W. Autant dire que le futur des LED est plutôt prometteur. Cela dit, certains inconvénients persistent : la taille du dispositif reste limitée et le procédé de fabrication nécessite de travailler à hautes températures et sous vide [18].

L'histoire des OLEDs commence dans les années 1950 (**Figure I.6**), en France, lors de la première observation d'électroluminescence dans des couches minces de cristal d'acridine et de quinacrine par Bernanose et al. En 1977, Shirakawa et al mettent en œuvre un des premiers polymères à haute conductivité, en dopant le polyacétylène avec de l'iode. Ils recevront, en 2000, le Prix Nobel de chimie pour « la découverte et le développement des polymères conducteurs ». Dans les années 1980, l'entreprise Kodak travaille sur le développement de dispositifs bicouches déposés en phase vapeur et composés de matériaux électroluminescents. Cela mènera en 1987 à la première OLED bicouche de Diamine/Alq3, avec un rendement quantique externe (RQE) de 1%, réalisée par Tang et VanSlyke. En 1990, Burroughes et al. présentent la première OLED fabriquée à base de polymère. Cette découverte conduit, en 1994, à la réalisation de la première OLED blanche (ou WOLED pour White light-emitting organic electroluminescent devices) par Kido et al [19].

L'intégration de ces dernières au sein de produits commercialisés a pu être constatée depuis le début des années 2000 (Figure I.6), comme dans des afficheurs simples commercialisés par Pioneer ou Philips par exemple. À partir de 2012, elles ont été intégrées dans des afficheurs plus complexes, tels que dans les écrans de téléphone portable Samsung. En 2015, des écrans de télévisions de grande taille utilisant la technologie OLED ont vu le jour [19].



**Figure I.6** : Évolution de la technologie OLED au cours du temps [19]

- **Première génération : les OLEDs fluorescentes :**

La OLED avait la forme d'une hétérostructure simple possédant une couche de Alq3 servant à la fois de matériau électroluminescent et de couche de transport d'électron ainsi qu'une couche d'une diamine pour le transport de trous. Le dispositif montrait une efficacité quantique d'environ 1%. Par contre l'efficacité du dispositif était limitée par le rendement quantique du Alq3. Puisque le transport de trous est généralement supérieur dans les OLEDs de ce type, le zone de recombinaison se trouve à l'interface entre la couche de Alq3 et la diamine. De plus, la recombinaison d'exciton est aussi possible à l'intérieur de la couche d'Alq3 puisque les trous peuvent diffuser à travers les premiers nanomètres de la ETL tandis que les électrons s'accumulent à l'interface de l'hétérostructure [21].

La deuxième étape importante dans le développement d'une OLED efficace fut la conception d'une OLED fluorescente rouge utilisant une mince couche d'Alq3 avec une faible concentration d'un émetteur rouge à haut rendement quantique, le DCM1. Cette mince couche était incluse dans la couche de Alq3 de la structure montrée à la **figure I.7**. De plus l'utilisation

d'une couche dopée permet de séparer les couches de transport de la EML permettant une optimisation indépendante des propriétés de transport et d'émission du dispositif [21].

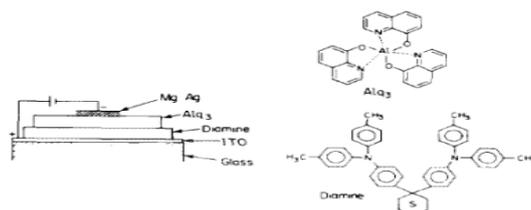


Figure I.7 : Hétérostructure de l'OLED [21]

• Deuxième génération : OLEDS PHOSPHORESCENTES

En 1998, l'équipe de Forrest (université de Princeton, États-Unis) annonce pouvoir récupérer 100 % des excitons formés dans le SCO en les transférant à un dopant phosphorescent présent en faible quantité dans ce dernier. Les diodes phosphorescentes (PhOLEDs), dont la couche émissive est un mélange SCO/dopant, ont alors pris peu à peu la place des OLEDs fluorescentes conduisant à une augmentation considérable des performances des dispositifs.

Dans une PhOLED, la couche active est un SCO (servant de matrice hôte) dopé en faible quantité (en général autour de 5 à 10 % en masse) par un émetteur phosphorescent (complexe d'iridium, de platine ou d'autres métaux lourds (osmium, etc.) [22].

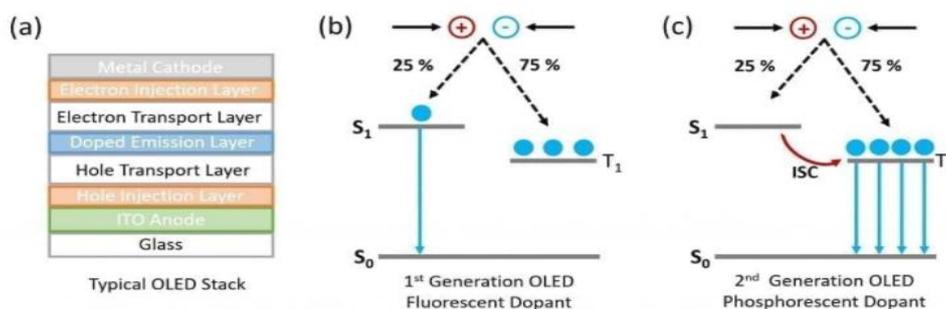
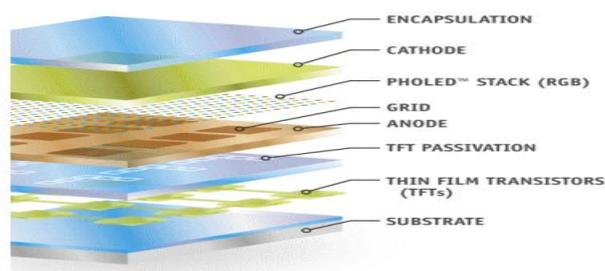


Figure I.8 : Schéma d'une pile OLED à émission par le bas typique (a) et mécanisme d'émission. (b) OLED dopées fluorescentes. (c) OLED dopées phosphorescentes [23]

PHOLED est une technologie non polymère à petite molécule qui consomme moins d'énergie que les écrans LCD. Combinés aux couleurs intenses de l'OLED, les PHOLED ont aidé l'OLED à devenir la technologie d'affichage dominante du 21e siècle [24].

Une OLED est une série de films minces organiques pris en sandwich entre deux électrodes, tous déposés sur un substrat. Lorsque l'électricité est appliquée, des porteurs de charge (trous et électrons) sont injectés de l'anode et de la cathode dans la couche PHOLED et se recombinent pour former des excitons, qui provoquent l'émission de photons [24].

Figure I.9 : Couches PHOLED. [24]



Les OLED rouges et vertes utilisées dans les écrans de smartphones et de télévision modernes sont des PhOLED de deuxième génération à haute efficacité. Le développement et la caractérisation de nouveaux matériaux et structures de diodes électroluminescentes organiques nécessitent à la fois la spectroscopie de photoluminescence des composants individuels et la caractérisation par électroluminescence du dispositif terminé. La caractérisation des diodes électroluminescentes organiques est démontrée par l'étude des propriétés d'émission d'un PhOLED dopé avec l'émetteur à base d'iridium  $\text{Ir}(\text{MDQ})_2(\text{acac})$  en utilisant l'état stable et résolu en temps spectroscopie d'électroluminescence et de photoluminescence [23].

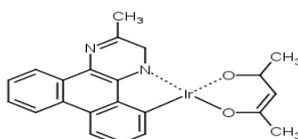


Figure I.10 : Structure chimique de l'émetteur phosphorescent  $\text{Ir}(\text{MDQ})_2(\text{acac})$  [23]

• **Troisième génération : Matériaux à fluorescence retardée thermiquement activée :**

Malgré le succès indéniable des émetteurs phosphorescents, la tendance général est maintenant vers le remplacement des composés organo-métalliques qui sont très dispendieux et polluants due à la présence de métaux lourds comme l'iridium et le platine dans le composé. La synthèse de nouveaux types de matériaux qui peuvent efficacement récolter les excitons triplets a donc été le défi de chimistes organiques durant les dernières années. Les matériaux de ce type les plus prometteurs pour les OLEDs sont appelés matériaux à fluorescence retardée thermiquement activée (TADF pour thermally activated delayed fluorescence). Ces matériaux possèdent un faible écart entre le niveau singulet et triplet excité  $S_1$  et  $T_1$   $\Delta E_{ST}$  généralement de l'ordre de 25 meV qui correspond à l'énergie thermique à température ambiante. Les excitons triplets peuvent donc être spontanément convertis en excitons singulets par conversion inter système renversée (RISC de reverse inter system crossing). Le processus de TADF est schématisé à la figure I.11 [21].

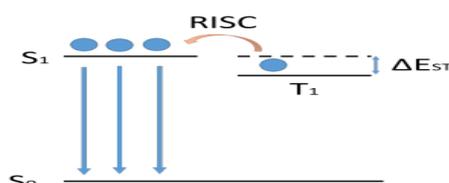


Figure I.11 : Diagramme du processus de TADF.

Après excitation d'un exciton triplet, celui-ci est soumis à un processus de RISC par activation thermique. L'excitation du triplet et la conversion en singlets combinés sont plus lents que l'excitation d'un exciton singulet. Les émetteurs TADF démontrent donc une fluorescence prompt et une fluorescence retardée [21].

En général, le niveau triplet est de plus faible énergie que le niveau singulet puisque la répulsion coulombienne des électrons est réduite à l'état triplet. En effet, le principe d'exclusion de Pauli tend à garder les électrons de même spin plus éloignés ce qui réduit la répulsion entre les deux charges. Afin d'obtenir une faible différence entre les énergies des niveaux singulet et triplet, les molécules TADF sont synthétisées afin de posséder un recouvrement spatial minimal entre les orbitales HOMO et LUMO de sorte à minimiser l'énergie d'interaction d'échange [21].

### I.5 Application OLED :

#### I.5.1 Domaine médical :

L'application principale des OLEDs est l'affichage pour les écrans plats. Ainsi elles sont utilisées en médicale comme moniteur (écran) pour la microscopie, l'endoscopie, etc.



Figure I.12 : L'affichage pour les écrans plats (OLED-LCD) [25]

- **Les OLED pour la luminothérapie [26]:**

Des études de cytocompatibilité de diodes électroluminescentes organiques (OLED) ont été menées pour la première fois sur des cultures cellulaires à Dresde afin de tester la tolérance des OLED par les cellules. Les résultats offrent des perspectives prometteuses pour l'utilisation des OLED dans le domaine médical, comme en luminothérapie. La luminothérapie est un moyen important de favoriser la cicatrisation des plaies. Les processus de guérison difficiles et

prolongés de la peau, tels que ceux dus aux plaies chroniques et infectées, représentent un défi pour les médecins traitants et peuvent être positivement affectés par l'exposition à la lumière.

**Figure I.13** : Etudes de cytocompatibilité des diodes électroluminescentes organiques



(OLED) [26]

### I.5.2 Domaine militaire :

La flexibilité est attrayante dans les applications militaires, ce qui équivaut généralement à une plus grande robustesse, c'est-à-dire que l'écran est moins susceptible de se casser. L'armée est également moins sensible au coût que les marchés de consommation, ce qui signifie qu'ils sont plus réceptifs aux nouvelles technologies avantages techniques mais coûts plus élevés. Par conséquent, les écrans OLED de faible puissance commencent à être utilisés dans un nombre croissant de applications militaires soutenant les soldats et les commandants dans la connaissance de la situation, thermique imagerie, simulation et formation. Deux types d'applications OLED sont actuellement à diverses phases de maturité ; les micro-écrans proches de l'œil, développés par eMagin et Flexible OLED développé par Universal Display Corporation (UDC). Les applications d'intérêt pour l'armée comprennent les PDA montés au poignet, très légers et robustes et des affichages électroniques portables tels que des "manchons d'affichage" [27].

- **Un casque très « Terminator » :**

Le casque, très « Terminator », sera également doté de deux « restituteurs » d'images utilisant la technologie OLED (Organic Light Emitting Diode) et offrant une définition de  $800 \times 600$  pixels sur 3 centimètres carrés. Dans ces petits oeillets indépendants l'un de l'autre, le soldat verra éventuellement de nuit grâce à une caméra thermique. Il pourra même effectuer du tir «déporté » afin de viser sans s'exposer, grâce à une caméra vidéo installée sur le fusil d'assaut Famas. Un soldat posté comme guetteur pourra également se servir de cette caméra pour envoyer de courtes séquences vidéo à ses chefs. Equipant déjà l'armée, le Famas sera doté d'une poignée supplémentaire, avec des boutons permettant au combattant de commander ses équipements (radio, système de visée...) sans lâcher son arme. Le fusil, relié par fil au reste du système, pourra également communiquer par liaison Bluetooth [28].

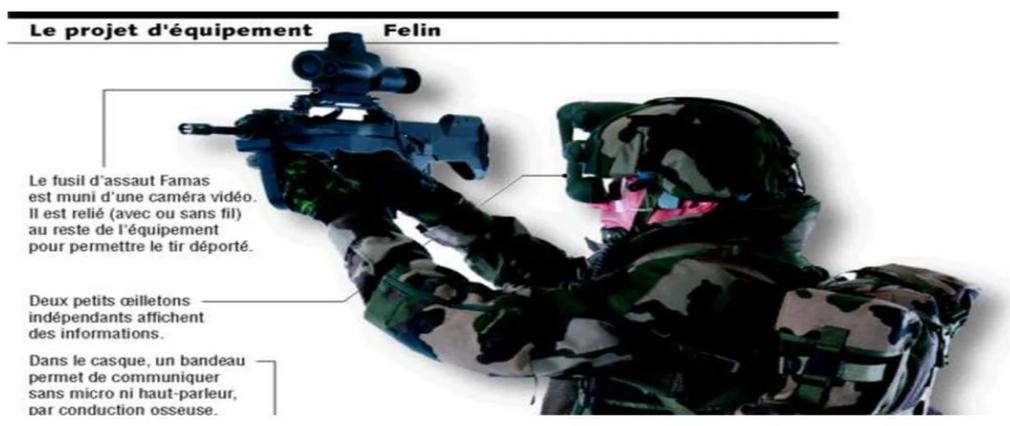


Figure I.14 : Les équipements du combattant du futur [28]

### I.5.3 Domaine photovoltaïque :

#### I.5.3.1 Cellules solaire organique OPV :

Une cellule photovoltaïque organique est un dispositif comprenant une couche active organique (à base de polymères ou de petites molécules) d'une épaisseur de l'ordre de centaine de nm, insérée entre deux électrodes. L'une d'entre elle doit être transparente afin de permettre la pénétration de la lumière. La couche active est constituée de deux matériaux, l'un accepteur d'électrons et l'autre donneur d'électrons [29].

Comme le montre la **figure I.15**, une cellule photovoltaïque organique est constituée d'une couche photosensible organique (formée des matériaux de type A et D), prise en sandwich entre deux électrodes, dont l'une d'elle doit être transparente afin de permettre le passage des photons dans la couche active. Lors de l'absorption de la lumière par la couche active, des porteurs de charges sont générés puis transportés au sein de la couche et collectés au niveau des électrodes. De cette façon, une cellule photovoltaïque organique convertit la lumière en électricité [1].

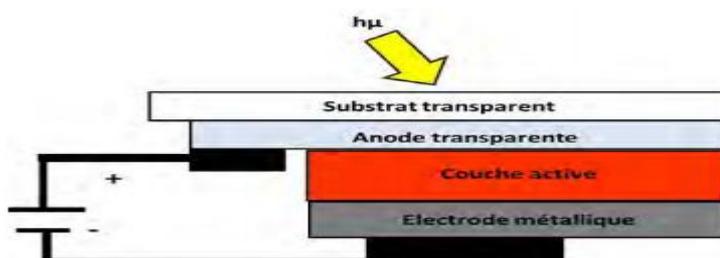
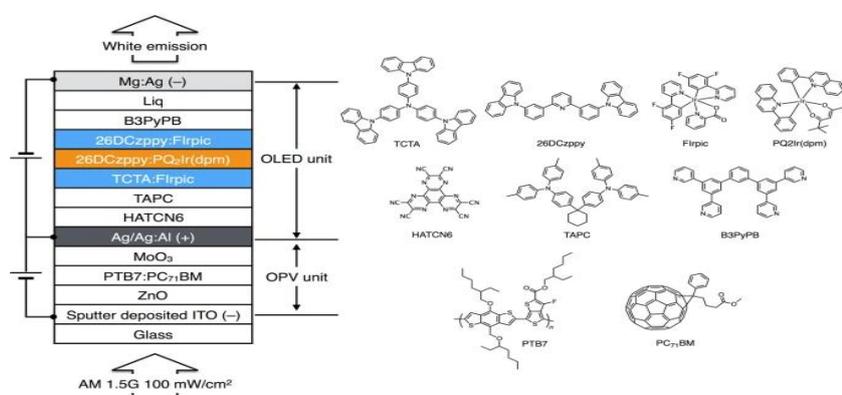


Figure I.15 : schéma d'une cellule solaire organique. [1]

#### I.5.3.2 Appareil OPV-OLED double mode avec photovoltaïque électroluminescent fonctionnalités :

Le développement rapide des dispositifs optoélectroniques organiques tels que le photovoltaïque organique (OPV) et les dispositifs électroluminescents organiques (OLED) sont en grande partie attribuables à leurs propriétés avantageuses de leur grande surface, leur épaisseur ultrafine, leur flexibilité, leur transparence et leur aptitude au traitement de la solution. Ici, nous fabriquons et caractérisons un dispositif OPV-OLED bimode avec une structure à trois

bornes comprenant une unité OPV inversée à hétérojonction en vrac à base de polymère et une OLED phosphorescente blanche à émission supérieure unité dos à dos connectée via une électrode intermédiaire en alliage métallique. Oxyde d'indium-étain déposé par pulvérisation a été utilisé comme cathode transparente de l'unité OPV inversée, tandis que l'Al dopé à l'Ag a servi d'Anode OPV/OLED, permettant le découplage des fonctions de production d'électricité et de mission légère. Notamment, le dopage d'Al par Ag a facilité la réduction de la rugosité de surface, permettant ce qui précède électrode à utiliser comme anode commune et réduisant le courant de fuite. Finalement, une unité OLED à émission supérieure comportait une couche ultrafine de Mg dopé Ag comme cathode semi-transparente. Ainsi, l'intégration réussie des éléments OPV-OLED entraîne le découplage de la production d'électricité et fonctionnalités d'émission de lumière, atteignant un rendement de conversion de puissance de 3,4% et un quantum externe efficacité de 9,9% [30].



**Figure I.16** : Structures de l'OPV-OLED bimode et de ses constituants chimiques. [30]

Dans ce dispositif intégré, la lumière incidente dans l'OPV était requise à orienter dans la même direction que celle émise par l'OLED. Ainsi, le développement d'un double mode OPV-OLED est nécessaire pour découpler les directions ci-dessus sans perte d'absorption.

De plus, le dispositif OPV-OLED bimode permet simultanément des caractéristiques photovoltaïques et électroluminescentes dans un seul dispositif. Ces nouvelles caractéristiques du dispositif bimode peuvent être appliquées aux "stores intelligents". En général, les stores bloquent la lumière du soleil, tandis que les stores intelligents par dispositif OPV-OLED double mode exploitent le potentiel du soleil comme énergie solaire pendant la journée. De plus, le dispositif OPV-OLED double mode peut être utilisé pour l'application d'éclairage la nuit [30].

## I.6 Avantages de la technologie OLED :

- **Plus de contraste et de luminosité sur les écrans :**

Cela s'explique notamment par le fait qu'ils ne nécessitent pas de dispositif de rétro éclairage. Par ailleurs, visuellement, on note aussi une amélioration des contrastes. Un pixel noir est éteint, et pas simplement atténué, ce qui se traduit par une amélioration du rendu relativement évidente [32].

- **Des écrans moins gourmands en énergie :**

Pour ce qui est d'un smartphone, un écran OLED présente un autre avantage non négligeable. Il se trouve que, dans la majorité des cas, il tire un peu moins sur la batterie que toute autre surface LED. L'autonomie est gagnée [32].

- **Pour un rendu général encore meilleur :**

En outre, la technologie OLED présente l'avantage d'offrir de meilleurs angles de vision, et un moindre taux d'assombrissement. Aussi, le temps de réponse est inférieur à 0,1 ms avec une rémanence largement inférieure à celle proposée sur un écran LCD [32].

### I.7 Inconvénients de la technologie OLED :

Comme dans le cas de la qualité des couleurs, la réduction du flou de mouvement dépend du contenu original. Théoriquement, la technologie OLED surpasse les normes LCD et LED en matière de transmission de mouvement [33].

En pratique, seuls les fichiers spécialement préparés et le mode de réduction du flou donnent des résultats notables. Par exemple, les films dynamiques avec une fréquence d'image de 24 images par seconde ne fonctionneront pas. Dans le même temps, il est plutôt difficile de trouver une vidéo en résolution 4K, avec des couleurs réalistes et une cadence élevée simultanément pour justifier l'achat d'un panneau OLED coûteux [33].

### I.8 Différence entre LCD et OLED :

- **Une question d'éclairage**

Dans le duel : OLED vs LCD, ou électroluminescence vs rétroéclairage, ces deux types d'écrans se distinguent en premier lieu par leur technologie lumineuse :

- À cristaux liquides, l'écran LCD fonctionne selon le principe de la polarisation, qui repose sur des transmetteurs de lumière. Cette dernière est diffusée par rétroéclairage, c'est-à-dire que les diodes sont réparties autour de l'écran ou directement sur sa surface. Les smartphones, les PC et les téléviseurs sont dotés d'écrans LCD depuis au moins deux décennies.
- Les diodes électroluminescentes organiques doivent leur spécificité au fait qu'elles émettent leur propre lumière [34].

- **Une question de pixels**

Dans le match OLED vs LCD, il faut également tenir compte du traitement des pixels, et de la qualité d'image qui en résulte :

- Avec la technologie LCD, le noir est créé par simulation, à travers une synthèse entre les sous-pixels bleus, verts et rouges. L'éclairage restant constant, il arrive parfois que les noirs se mettent à tirer sur le gris. Le rendu des couleurs est beaucoup moins net qu'avec l'OLED, où chaque pixel est éteint un à un.
- Grâce à cette technique, l'OLED aboutit à des contrastes infinis. Les nuances de couleurs qui apparaissent sur un écran OLED sont d'une richesse inédite, de même que

la profondeur du champ. Un appareil photo numérique avec écran OLED capture ainsi la réalité dans la moindre de ses nuances, y compris celles qui sont invisibles à l'œil nu [34].

- **Une question d'angle de vision**

Sur ce point, les écrans OLED apportent une véritable amélioration. Contrairement aux téléviseurs LCD, ils offrent un angle de vision presque total. Ce qui veut dire que :

- Où qu'on soit assis, on peut suivre ce qui se passe à l'écran. Pour regarder un film, on sera toujours bien placé, quel que soit l'angle de la pièce dans lequel on se trouve.
- Non seulement les images sont bien visibles, mais les couleurs restent vives, les contrastes sont préservés. Tous les téléspectateurs bénéficient de la même qualité de visionnage [34].

### **I.9 Conclusion :**

Matériaux organiques (petites molécules et polymères) sont très prometteurs pour une nouvelle technologie d'affichage.

- Forte croissance.
- Petites molécules permettent de réaliser des structures plus complexes et constituent actuellement la technologie la plus avancée.
- Les polymères semblent mieux appropriés pour de grandes surfaces par exemple [31].

L'OLED est une technologie émergente, mais elle s'est rapidement développée grâce aux modifications continues de sa structures (monocouche, bicouche, multicouche) ce qui en fait une partie intégrante du développement de divers secteurs (médicales, militaires, l'éclairage, affichages, ...etc.).

**Chapitre II**

**Etat de l'art des Diodes  
électroluminescentes organiques**

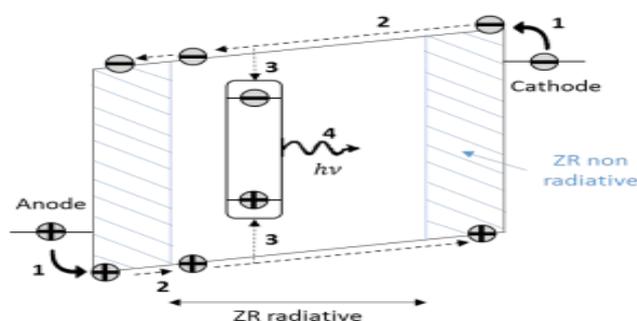
**OLED**

## II.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons le fonctionnement des diodes électroluminescence organique. Dans un premier temps, nous déterminerons le phénomène d'électroluminescence à l'intérieur des matériaux organiques. Ensuite, nous analyserons les différentes structures OLED, ainsi que les différentes technologies.

## II.2 Électroluminescence principe de base :

L'électroluminescence se décompose en plusieurs étapes et commence par l'injection de porteurs de charges au sein du dispositif. Des électrons sont injectés par la cathode et les trous par l'anode (**Figure II.1**). Ces charges transitent au sein des différentes couches organiques jusqu'à leur recombinaison (zone de recombinaison (ZR)). Une paire électron-trou est ainsi créée et peut se désexciter de façon radiative ou non [19].



**Figure II.1** : Étapes de base de l'électroluminescence : (1) injection des porteurs de charges, (2) transport, (3) formation d'un exciton, (4) désexcitation radiative de l'exciton[19]

## II.3 Structure d'une diode électroluminescente organique :

L'électroluminescence organique est basée sur l'injection de porteurs de charges dans le matériau. Les diodes organiques Électroluminescentes ont ainsi une structure multicouche avec deux électrodes qui prennent en sandwich un film de matériau organique électroluminescent [35].

### II.3.1 Structure monocouche (OLED Bulk) :

Typiquement, une OLED monocouche est constituée d'un film de semi-conducteur organique luminescent d'environ 100 nm d'épaisseur inséré entre deux électrodes de natures chimiques différentes (**figure II.2**). L'anode injecte des trous et la cathode des électrons. De plus l'une de ces deux électrodes doit être transparente pour laisser passer la lumière émise[35].

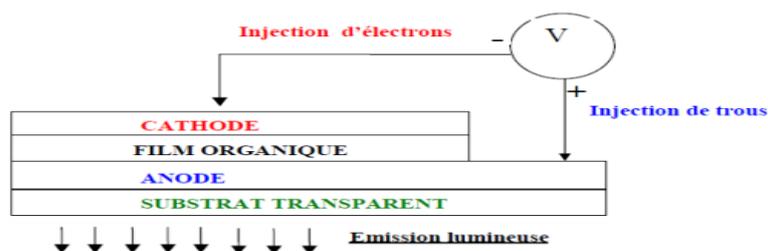


Figure II.2 : Structure d'une diode monocouche. [35]

Le mécanisme d'électroluminescence peut être résumé par le processus suivant :

- Lorsqu'un champ électrique est appliqué entre les électrodes, des électrons et des trous sont injectés dans la couche organique à partir de la cathode et de l'anode, respectivement. Cette injection forme des polariseurs positifs et négatifs.

- Les polarons sont transportés dans la couche organique jusqu'à leur zone de recombinaison.

- Les excitons se forment lorsque le polaron positif rencontre le polaron négatif.

- La désexcitation de ces excitons produit une émission lumineuse dont la couleur dépend du gap énergétique de la couche d'émission.

### II.3.2 Structure bicouche : simple hétéro jonction :

Un meilleur équilibre peut s'obtenir en utilisant deux couches organiques, l'une optimisée avec l'anode pour le transport de trous et l'autre optimisée pour l'injection et le transport d'électrons. Les charges de signes opposés sont bloquées à l'interface entre les deux couches organiques. La recombinaison et la formation de l'exciton intervient dans le matériau de plus faible gap d'énergie. Cette structure bi-couche permet d'éloigner l'exciton des électrodes, ce qui conduirait à une extinction de la luminescence. Avec cette structure, il est possible de réduire la tension seuil et d'améliorer la stabilité de fonctionnement par un meilleur contact à l'interface entre la couche de transport de trous et l'anode [36].

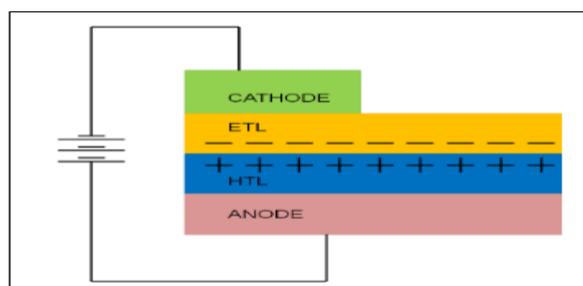


Figure II.3 : Structure de base d'OLED[3]

### II.3.3 Structure multicouche :

Afin de renforcer la recombinaison des charges dans la couche émettrice et de diminuer les barrières d'injection, plusieurs autres couches, ayant des fonctions spécifiques, peuvent être introduites dans la structure de la diode telles que des couches pour l'injection des trous et des électrons (HIL et EIL), des couches pour le transport des trous et des électrons (HTL et ETL)

et des couches pour le blocage des trous ou des électrons (HBL et EBL). Ces structures multicouches permettent d'augmenter les performances de la diode [35].

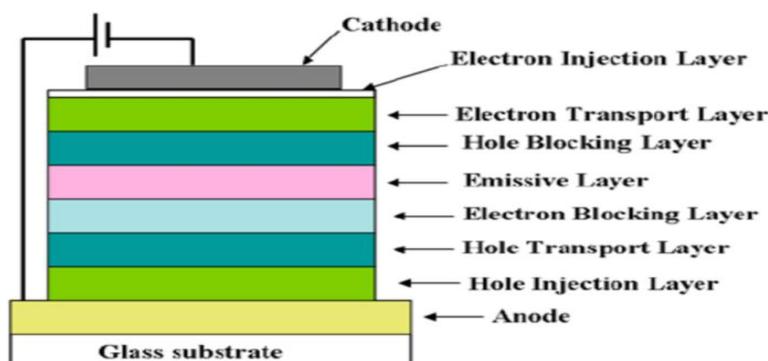


Figure II.4 : Diagramme schématisé de la structure multicouche d'un OLED[37]

## II.4 Principe de fonctionnement des OLEDs :

Une diode électroluminescente organique se compose de plusieurs couches semi-conductrices organiques en structure sandwich entre deux électrodes dont l'une (au moins) est transparente. La **Figure II.5** représente la structure la plus simple d'une OLED (monocouche) qui se compose d'une couche organique émissive prise en sandwich entre une anode et une cathode. Le mécanisme d'électroluminescence peut être résumé par les processus suivants [10] :

### II.4.1 Injection des charges :

Pour aboutir à l'émission de lumière électroluminescente dans les OLED, la première étape est d'injecter des charges électriques depuis les électrodes. Elle consiste à attirer des charges depuis les électrodes vers le matériau organique sous l'effet d'un champ électrique extérieur. Les charges sont soit des électrons (plutôt des polarons négatifs) injectés depuis la cathode soit des trous (polarons positifs) injectés depuis l'anode. Dans chacun des cas, les charges doivent franchir une barrière d'énergie non négligeable formée par l'interface [35].

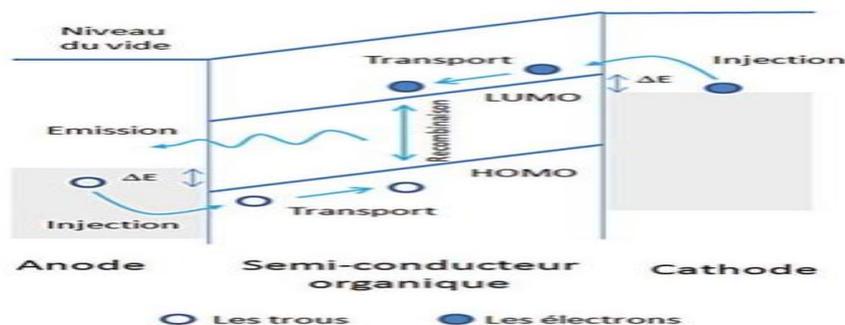


Figure II.5 : Schéma du principe de fonctionnement d'une OLED monocouche[1]

### II.4.2 Transport des électrons

Il est nécessaire d'introduire des matériaux pour transporter les électrons provenant de la cathode jusqu'à la zone de recombinaison. Les matériaux organiques ayant la capacité de conduire des électrons, sont nommés accepteurs ou transporteurs d'électrons. Un bon matériau transporteur d'électrons se caractérise par une importante mobilité des électrons et un LUMO proche du travail de sortie de la cathode [35].

### II.4.3 Transport des trous

La majorité des matériaux organiques conduisent les trous: ils sont dits donneurs (d'électrons) par abus de langage ou plutôt transporteurs de trous. Ainsi, dans une structure OLED, la couche HTL est proche de l'anode, source de charges positives. Un bon transporteur de trous est caractérisé par un HOMO relativement profond (autour de 5,4 eV) et une mobilité de trous importante. Une disposition adéquate de ces différentes molécules permet le confinement des électrons et des trous au niveau de la zone de recombinaison grâce à des barrières d'énergie, ce qui améliore la valeur du taux de recombinaison [35].

### II.4.4 Recombinaison des porteurs de charges :

Un exciton, assimilé à une quasi-particule neutre, est une paire électron-trou (recombinés) liée par l'interaction coulombienne [38]. Lorsque ces excitons sont désexcités, ils émettent de la lumière. L'emplacement de la zone de recombinaison dans la diode est fonction de la mobilité des charges et du champ électrique dans le semi-conducteur. La mobilité des trous est généralement différente de la mobilité des électrons dans les semi-conducteurs organiques.

### II.4.5 Désexcitation :

L'exciton formé cherche à se stabiliser et pour cela, il doit se désexciter en émettant de la lumière. Cette émission se fait soit de manière radiative ou non (radiative). La désexcitation radiative correspond à l'état singulet qui conduit à la fluorescence avec un rendement de 25%, alors que la désexcitation non radiative correspond à l'état triplet qui conduit à la phosphorescence avec un rendement quantique de 75% [39].

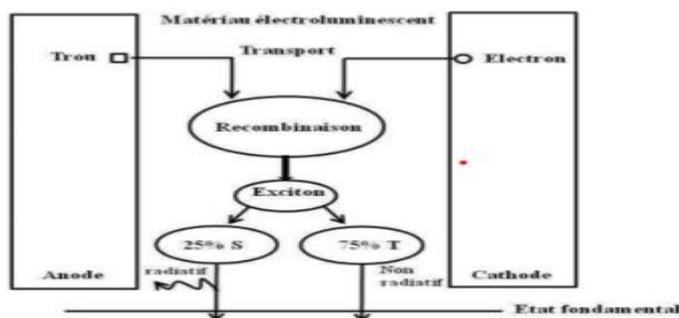


Figure II.6 : Schéma simplifié de fonctionnement d'une OLED. [39]

## II.5 Caractérisation d'une OLED

Comme tous les appareils électroniques ou optoélectroniques, OLED dispose d'une variété de paramètres qui peuvent être utilisés pour évaluer ses performances.

### II.5.1 Caractérisation électrique :

#### II.5.1.1 Courbes courant-tension-luminance « I-V-L » :

La mesure des courbes courant-tension-luminance (courbes I-V-L) permet de déterminer les performances des diodes électroluminescentes (**figure II.7**). Le tracé des courbes I-V-L est obtenu par l'augmentation progressive de la tension aux bornes du dispositif et du relevé ponctuel du courant traversant la diode et de la lumière produite. Ces mesures permettent d'évaluer et de relier les propriétés électriques aux propriétés optiques du dispositif [1].

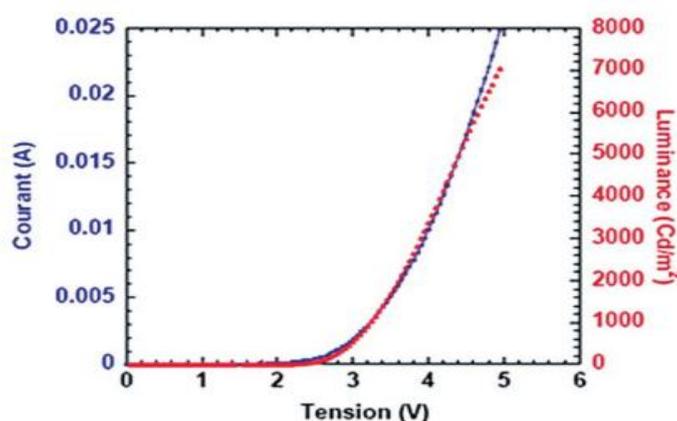


Figure II.7 : Courbe I-V-L (courant-tension-luminance) [1]

#### II.5.1.2 Spectre électroluminescent EL :

Le principe consiste à mesurer le signal lumineux émis en fonction de la longueur d'onde d'émission. La longueur d'onde correspondant au pic du signal lumineux renseigne sur la couleur émise par le dispositif.

#### II.5.1.3 Rendements :

##### a) Rendement énergétique :

Le rendement énergétique est le rapport de la puissance lumineuse émise par la puissance électrique dépensée. Usuellement dans le domaine de la visualisation, il s'exprime en lumens par watt (lm.W<sup>-1</sup>), on parle alors d'efficacité lumineuse par la relation [35]:

$$\eta_e = \frac{L \cdot \pi \cdot S}{U \cdot I} \quad (\text{II.1})$$

Avec : L : la luminance en Cd.m<sup>-2</sup>.

S : la surface de la diode en m<sup>2</sup>.

U : la tension appliquée en V.

I : le courant traversant la structure en A.

**b) Rendement lumineux :**

Traduit l'efficacité de la recombinaison des électrons et des trous au sein de l'OLED. Il est exprimé en Cd/A et déterminé selon l'équation [19] :

$$\eta_q = \frac{L \cdot S}{I} = \frac{L}{J} \quad \text{(II.2)}$$

Où : L c'est la luminance en (cd/m<sup>2</sup>), elle représente l'intensité lumineuse d'une source lumineuse étendue dans une direction donnée, par l'aire apparente de cette source dans cette même direction.

J : est la densité de courant. Ce rendement se distingue des rendements quantiques internes et externes (RQI et RQE respectivement), qui s'expriment eux en %, et représentent le nombre de photons émis par rapport aux nombres d'électrons injectés. Le RQI, étant interne au dispositif, n'est pas mesurable directement, mais peut seulement être estimé grâce aux mesures externes. Pour ces raisons, le RQE est plus largement utilisé dans la littérature, afin de comparer les différentes performances des OLEDs réalisées. Il présente aussi l'avantage de ne pas prendre en compte la sensibilité de l'œil, contrairement à la luminance. Cependant, les valeurs trouvées dans la littérature sont souvent des maxima qui sont mesurés pour de faibles densités de courant (10<sup>-3</sup> - 10<sup>-1</sup> mA/cm<sup>2</sup>) au lieu de celles utilisées en fonctionnement nominal des diodes (1 - 10 mA/cm<sup>2</sup>). De plus, le RQE peut varier selon la structure du dispositif, ainsi que les conditions de mesures [19].

$$\eta_{int} = \frac{N_{photons \text{ émis internes}}}{N_{charges \text{ injectées}}} = \frac{\beta \cdot \frac{\square s}{T}}{1} \cdot \eta_{PL} \quad \text{(II.3)}$$

N<sub>photons émis internes</sub> : représente le nombre total de photons émis à l'intérieur de l'OLED

N<sub>charges injectées</sub> : est le nombre de trous ou d'électrons injectés

β : est le rendement de recombinaison c'est-à-dire le rendement de formation des excitons

$\frac{\square s}{T}$  : est le nombre d'excitons susceptible d'émettre de la lumière

η<sub>PL</sub> : est le rendement de photoluminescence [35]

$$\eta_{ext} = \eta_{int} \cdot \eta_{extraction} = \frac{\beta \cdot \frac{\square s}{T}}{1} \cdot \eta_{PL} \cdot \eta_{extraction} \quad \text{(II.4)}$$

η<sub>extraction</sub> : est le coefficient d'extraction. Cette valeur est proche de 0,2 pour les substrats en verre, indiquant que 80 % de la lumière produite est perdue [35].

**II.6 Types OLED :**

**II.6.1 OLED Tandem :**

La diode électroluminescente organique tandem (OLED) est un appareil qui relie deux ou plusieurs unités électroluminescentes avec une ou plusieurs couches de génération de charge (CGL), et permet l'émission de lumière unités pour émettre de la lumière simultanément. Étant donné que le flux de courant à travers chaque unité électroluminescente est le même dans un OLED en tandem, l'OLED en tandem nécessite toujours un courant plus faible qu'un OLED simple typique pour atteindre une luminance cible. L'OLED tandem est avantageux pour les

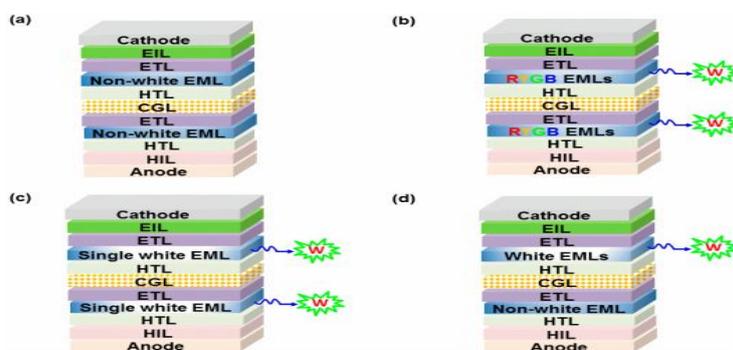
applications qui nécessitent durée de vie à luminance élevée car le fonctionnement à faible courant a pour effet d'améliorer la durée de vie de l'OLED. De plus, en fonction de la couleur d'émission de chaque unité électroluminescente, l'OLED tandem peut être utilisée pour réaliser une émission de lumière blanche ou autre. Pour cette raison, l'OLED tandem est à l'étude largement en tant que technologie d'appareil importante pour les écrans et l'éclairage OLED commerciaux. Parmi un certain nombre de recherches liées aux OLED en tandem, les questions les plus étudiées sont la structure CGL efficace et le mécanisme de travail. Un CGL est généralement composé de couches de type n et p, et les charges générées dans le CGL sont injectées dans les unités électroluminescentes adjacentes. La CGL peut être divisé en deux types selon les matériaux formant les couches. L'un est CGL utilisant des matériaux inorganiques tels que le métal ou l'oxyde métallique, et l'autre est CGL à hétéro-jonction organique [40].

OLED en tandem avec différentes émissions les espèces dans chaque unité de répétition peuvent générer des émissions de longueurs d'onde multiples, qui peuvent être combinées pour générer de la lumière blanche. Si la même espèce émettrice est incorporée dans chaque unité répétée, plus étroite des spectres d'électroluminescence (EL) peuvent être obtenus [41].

- **L'architecture de périphérique des OLED en Tandem :**

Pour les WOLED unitaires, les couches émettrices (EML) peuvent être composées d'un ou de plusieurs EML. En général, les WOLED à EML unique n'ont besoin que d'un EML composé d'un hôte polyvalent dopé avec des invités de différentes couleurs, tandis que plusieurs WOLED EML nécessitent au moins deux EML pour produire des émissions blanches. En conséquence, l'unité EL du tandem Les WOLED pourraient être composés d'EML non blancs ou monochromatiques, où des EML de différentes couleurs sont situés dans différentes unités EL à combiner pour l'émission blanche (architecture WOLED tandem de type I), comme le montre la **figure II.8.a**. En outre, chaque unité de tandem de WOLED peut être composée de plusieurs EML unité blanche (architecture WOLED tandem de type II, **Figure II.8.b**) ou unité blanche simple-EML (type-III architecture en tandem WOLED, **figure II.8.c**). Alternativement, deux WOLED en tandem à base d'unités peuvent être construits par un bloc blanc et un bloc non blanc (architecture WOLED tandem de type IV, **figure II.8.d**)[42].

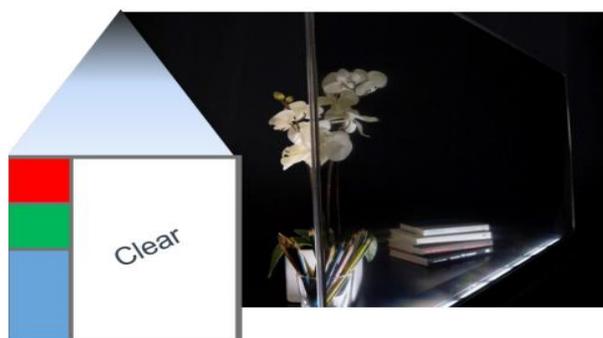
La plupart des WOLED tandem sont concentrés sur deux ou trois unités EL, bien que plus de quatre unités puissent être connectées avec des CGL. [42]



**Figure II.8 :** Différents types d'architecture WOLED en Tandem[42]

### II.6.2 TOLEDs (Transparent OLEDs) :

Transparent OLED est une technologie d'affichage transparent qui affiche des informations dynamiques ou interactives sur un support transparent verre de surface, permettant aux utilisateurs de voir ce qui est affiché sur le l'affichage tout en étant capable de voir à travers. Les concepteurs peuvent superposer du texte, des images numériques et du contenu vidéo sur des objets physiques ou des scènes qui se trouvent derrière la vitre. Les écrans OLED transparents sont auto-émetteurs et utilisent Organic Technologie de diode électroluminescente (OLED) pour éliminer le besoin d'un rétro-éclairage ou une enceinte, permettant de créer des installations véritablement transparentes dans un design en verre pratiquement sans cadre [36].



**Figure II.9** : Affichage d'écran TOLED [43]

Les diodes électroluminescentes organiques (OLED) sont une solution prometteuse source de lumière pour les applications d'éclairage. L'éclairage OLED peut offrir des fonctionnalités distinctes, telles que la transparence, l'accord des couleurs, et un indice de rendu des couleurs élevé. En particulier, les OLED transparents (TOLED) ont été activement étudié pour les écrans OLED de grande taille, et éclairage TOLED. Un TOLED typique structure se compose d'une anode transparente composée d'oxyde d'indium-étain (ITO), des couches organiques et une cathode transparente. Dans les TOLED, une cathode transparente avec une structure  $\text{LiF}/\text{Al}/\text{Ag}$  fréquemment utilisée. Cependant, la faible transparence et la résistance de couche élevée d'une cathode limitent leur taille et capacité de performances.

Pour concevoir des panneaux TOLED de grande surface de haute qualité, la répartition de la luminance des panneaux doit être connue. La distribution de la luminance dans les panneaux de plus grande surface est déterminée par l'interaction entre la distribution actuelle de l'anode et la cathode, ce qui rend assez difficile la prédiction de la distribution[44].

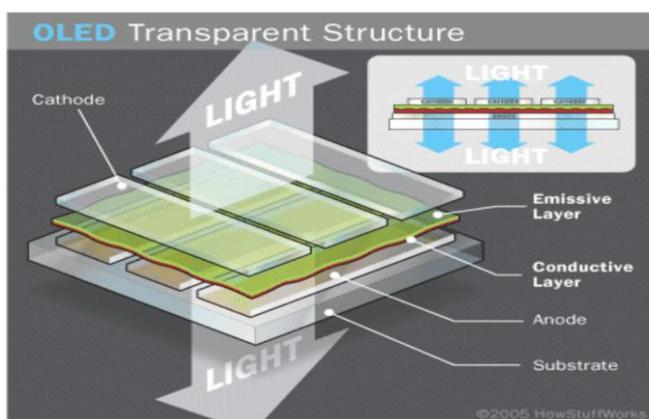


Figure II.10 : La structure TOLED [45]

### II.6.3 OLED à matrice passive (PMOLED) :

Les PMOLED ont des bandes de cathode, des couches organiques et des bandes d'anode. Les bandes anodiques sont disposées perpendiculairement aux bandes cathodiques. Les intersections de la cathode et de l'anode constituent les pixels où la lumière est émise. Des circuits externes appliquent un courant à des bandes sélectionnées d'anode et de cathode, déterminant quels pixels sont allumés et quels pixels restent éteints. Encore une fois, la luminosité de chaque pixel est proportionnelle à la quantité de courant appliqué [46].

Les PMOLED sont faciles à fabriquer, mais ils consomment plus d'énergie que les autres types d'OLED, principalement en raison de la puissance nécessaire pour les circuits externes. Les PMOLED sont les plus efficaces pour le texte et les icônes et conviennent mieux aux petits écrans (2 à 3 pouces de diagonale) tels que ceux que vous trouvez dans les téléphones portables, les PDA et les lecteurs MP3. Même avec les circuits externes, les OLED à matrice passive consomment moins d'énergie de la batterie que les écrans LCD qui alimentent actuellement ces appareils [46].

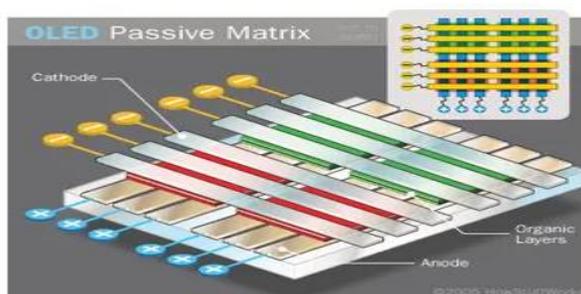
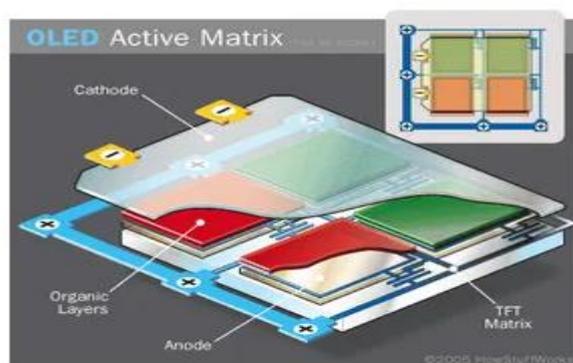


Figure II.11 : Structure OLED à matrice passive (PMOLED) [46]

### II.6.4 OLED à matrice active (AMOLED) :

Les AMOLED ont des couches complètes de cathode, de molécules organiques et d'anodes, mais la couche d'anode recouvre un réseau de transistors à couche mince (TFT) qui forme une matrice. La matrice TFT elle-même est le circuit qui détermine quels pixels sont activés pour former une image.

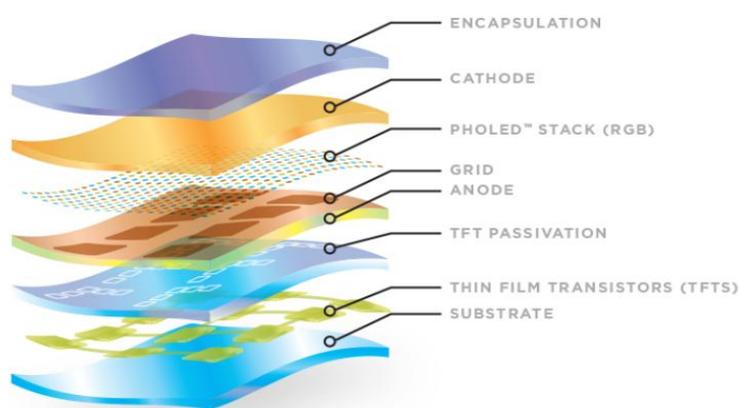
Les AMOLED consomment moins d'énergie que les PMOLED car la matrice TFT nécessite moins d'énergie que les circuits externes, ils sont donc efficaces pour les grands écrans. Les AMOLED ont également des taux de rafraîchissement plus rapides adaptés à la vidéo. Les meilleures utilisations des AMOLED sont les écrans d'ordinateur, les téléviseurs à grand écran et les panneaux ou panneaux d'affichage électroniques [46].



**Figure II.12 :** Structure Active-matrix OLED (AMOLED)[46]

### II.6.5 OLED flexibles (FOLED) :

Les FOLED sont des OLED construites sur des substrats non rigides tels que du plastique ou une feuille métallique. Cela améliore la durabilité et permet la conformation à certaines formes et même des pliages, des roulements ou des flexions répétées. Les FOLED, ouvrent de nouvelles possibilités de conception pour les industries de l'affichage et de l'éclairage. Juste à imaginer un téléphone portable qui ressemble à un stylo mais qui dispose d'un écran couleur lumineux qui s'enroule et se déroule pour l'utilisation, les produits de consommation et d'éclairage, y compris un smartphone pliable qui pourrait s'ouvrir sur un écran de tablette, un téléviseur qui pourrait s'enrouler dans la poche et des panneaux d'éclairage intérieur transparents conformables qui pourraient être incassables. Ces idées offrent, un simple aperçu des merveilles et des possibilités qu'engendrent les FOLED. Nous appelons cela l'Universal Communication Device™ (UCD). [47]



**Figure II.13 :** Structure OLED flexibles (FOLED) [47]

## **II.7 Avenir des OLED :**

- **Ouvrir de nouvelles voies pour la technologie OLED**

La technologie OLED pourrait inaugurer une nouvelle ère de produits d'affichage et d'éclairage de grande surface, transparents, flexibles et à faible consommation d'énergie. Les OLED sont principalement produites commercialement sur des substrats de verre rigides. Cependant, les premières applications telles que les montres ou les écrans courbés utilisant des OLED flexibles sont récemment entrées sur le marché. Le développement d'OLED suffisamment durables et flexibles nécessitera de meilleurs matériaux et un développement plus poussé des outils et des processus de fabrication. Les substrats en plastique flexible ont besoin de couches barrières améliorées pour protéger les OLED de l'humidité et de l'oxygène. L'encapsulation à couche mince est également nécessaire pour créer des OLED minces et flexibles à base de métal et de verre [48].



**Figure II.14 :** Affichage des informations sur la OLED voiture [49]



**Figure II.15 :** Visionox : prototype flexible [50]

## **II.8 Différentes couches du dispositifs OLEDs :**

### **II.8.1 La couche d'injection de trous (Hole Injection Layer HIL) :**

Pour faciliter l'injection des trous par l'anode au sein du matériau électroluminescent et pour avoir aussi une protection contre la diffusion d'impuretés provenant de cette même anode, on dépose une première couche organique dite « d'injection de trous » juste sur l'anode [35].

### **II.8.2 Les couches émettrices (Electroluminescent Layer EL) :**

La longueur d'onde émise est directement liée à la largeur du gap du matériau. Pour réaliser différentes diodes émettant différentes couleurs, il faut donc choisir les matériaux organiques en fonction de leur bande interdite [35].

### **II.8.3 Couche de transport des porteurs de charges :**

Déposée entre la couche injectrice de charge et la couche émissive, le matériau utilisé doit posséder un niveau HOMO pour les trous (LUMO pour les électrons) proche du niveau HOMO

du matériau émissif (LUMO) afin de permettre l'injection des trous (électrons) depuis l'électrode jusqu'à l'EML [51].

### II.8.4 Couche bloquantes de porteurs de charges :

Il peut être nécessaire d'ajouter des couches bloquantes de porteurs de charges de part et d'autre de la couche émissive. En effet, il est possible que des électrons passent dans la HTL si ce dernier a un niveau LUMO plus élevé que le niveau LUMO de l'EML. Afin de remédier à cela, un EBL avec un niveau LUMO plus bas que celui de l'EML peut être ajouté en veillant à ce que son niveau HOMO soit proche de celui du matériau émissif et du HTM afin de ne pas gêner l'injection des trous. Un matériau HTL peut aussi être EBL s'il possède les niveaux HOMO et LUMO adéquats [51].

### II.8.5 Le choix des électrodes :

Les électrodes doivent être soigneusement sélectionnées en fonction de sortie des électrodes et l'injection des charges dans les couches organiques parce qu'ils affectent sur l'efficacité lumineuse et la tension de fonctionnement.

#### II.8.5.1 Anode :

L'anode est généralement réalisée à partir d'une couche d'oxyde d'indium et d'étain (ITO), déposée sur un substrat de verre ou de plastique. Les exigences générales pour qu'un matériau puisse servir d'anode sont [10]:

1. Bonne conductivité afin de réduire la résistance de contact
2. Travail de sortie élevée ( $W_M > 4.1\text{eV}$ ) pour assurer une injection efficace des trous
3. Bonne stabilité, à la fois thermique et chimique
4. Bonne propriété filmogène pour assurer un bon contact avec la couche organique adjacente
5. Transparence.

L'anode en ITO satisfait aux trois conditions : transparence ( $> 80\%$  entre 400-800 nm), conductivité (sa résistance est comprise entre 10-20  $\Omega/\text{m}$ ) et adéquation de son travail de sortie au niveau HOMO avec plupart des polymères conjugués (4,7 – 5,2 eV). L'utilisation de l'ITO permet l'émission de lumière à travers l'électrode. Toutefois, une diffusion de l'indium ou de l'oxygène de cet oxyde est possible vers les couches organiques, ce qui cause leur détérioration. De plus, sa surface est souvent rugueuse et inhomogène [10].

#### II.8.5.2 Cathode :

La cathode est généralement obtenue à partir des évaporations successives d'une couche de calcium puis d'une couche d'aluminium. Le faible travail de sortie du calcium (2,9 eV) permet d'améliorer l'injection des électrons au sein des couches organiques. La couche d'aluminium sert uniquement dans ce cas de couche de protection pour prévenir l'oxydation rapide du calcium en présence d'oxygène. L'utilisation d'une cathode simple en aluminium permet d'effectuer des mesures à l'air libre. Les performances obtenues sont toutefois plus faibles car le travail de sortie de l'aluminium est plus grand (4,6 eV). Pour certaines OLEDs, une cathode en argent peut être utilisée. Ce métal a un travail de sortie proche de l'aluminium (4,8 eV) et son utilisation est moins agressive pour les nacelles d'évaporation car l'aluminium s'amalgame

rapidement avec celles-ci. Le principal défaut de l'argent est qu'il diffuse aisément à travers les couches organiques ; les DELOs sont alors court-circuitées lors de leur mise sous tension. Pour remédier à ces phénomènes, des OLEDs avec une cathode en calcium recouverte d'une couche protectrice d'argent peuvent être réalisés [52].

### II.9 Matériaux pour les OLEDs (Tandem et Bulk) :

- **Alq3** : Le **tris(8-hydroxyquinoléine) aluminium(III)**, communément appelé **Alq3**, est largement utilisé dans les diodes électroluminescentes organiques (OLED) en tant que matériau de transport d'électrons (ETL) et matériau de couche émettrice (EML) en raison de sa stabilité thermique élevée, rendement quantique élevé de fluorescence et capacité élevée de transport d'électrons. Alq3 en tant que matériau de couche de transport d'électrons et d'émission a été le premier OLED efficace de faible poids moléculaire rapporté par Tang en 1987. Depuis lors, les métaloquinolates sont devenus l'objet de nouvelles recherches sur les matériaux électroluminescents, Alq3 étant le plus étudié [53].

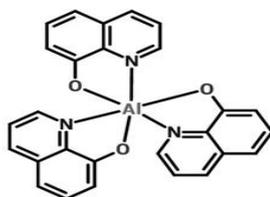


Figure II.16 : Structure chimique du tris-(8-hydroxyquinoléine) aluminium (Alq3) [53]

- **Ir(ppy)3** : Le **tris(2-phénylpyridine) iridium(III)** ; **Ir(ppy)3**, est largement utilisé dans les diodes électroluminescentes organiques (OLED) en raison de ses rendements quantiques élevés et de sa stabilité thermique. Utilisant tous ses excitons singulet et triplet pour l'émission, cette lumière verte émettant Ir(ppy)3 présente une phosphorescence très brillante avec un rendement quantique interne de presque 100 %. C'est l'un des émetteurs triplet verts les plus performants dans le domaine en développement rapide de la technologie d'affichage OLED [54].

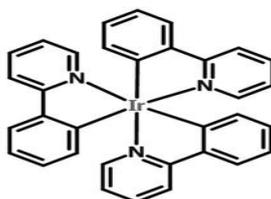


Figure II.17 : Structure chimique du tris(2-phénylpyridine) iridium [Ir(ppy)3] [54]

- **BCP** : Le **4,4'-Bis(N-carbazolyle) -1,1'-biphényle (BCP)** est l'un des matériaux hôtes les plus largement utilisés pour des diodes électroluminescentes organiques fluorescentes et phosphorescentes efficaces avec une mobilité élevée des trous. Cela est dû à sa propriété riche en électrons à partir de deux unités carbazolyle. Il a été démontré que le CBP peut efficacement héberger des émetteurs phosphorescents verts, jaunes et rouges avec des énergies de triplet inférieures à celle du CBP [55].

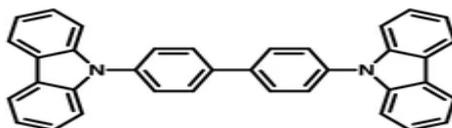


Figure II.18 : Structure chimique du 4,4'-bis(N-carbazolyl) -1,1'-biphényle (CBP) [55]

- **TAZ : 3-(biphényl-4-yl) -5-(4-tertbutylphényl) -4-phényl-4H-1,2,4-triazole (TAZ)** à base de 1,2,4-triazole (HOMO /LUMO : 6,3/2,7 eV) a principalement été utilisé dans les OLED phosphorescentes bleues (PhOLED) pour servir de couche efficace de transport d'électrons et de blocage des trous en raison de son niveau d'énergie triplet élevé qui confinerait les excitons triplet dans la couche émissive.

Le faible niveau d'énergie HOMO/LUMO de la TAZ est bénéfique pour bloquer les trous et faciliter l'injection/le transport d'électrons, améliorant ainsi les performances de l'appareil [56].

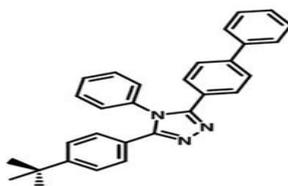


Figure II.19 : Structure chimique du 3-(Biphényl-4-yl) -5-(4-tert-butylphényl) -4-phényl-4H-1,2,4-triazole (TAZ) [56]

- **HMTPD : N, N, N', N'-Tetrakis (3-méthylphényl) -3, 3'-diméthylbenzidine** : Ce matériau est un nouveau matériau hôte haute performance utilisé pour les dispositifs d'éclairage électroluminescent organique pour une efficacité et une durée de vie élevées. Des rendements internes de 87 % et des rendements externes de 20 % ont été atteints[57].

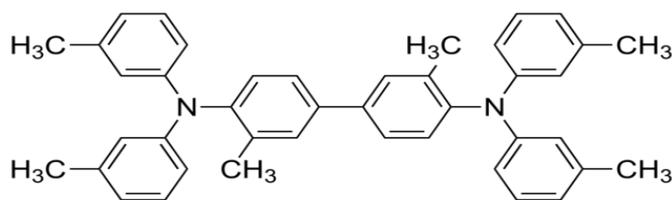


Figure II.20 : Structure chimique du N, N, N', N'-Tetrakis(3-méthylphényl) -3,3'-diméthylbenzidine (HMTPD)[57]

## II.10 Synthèse d'OLED :

**II.10.1 Gravure de l'ITO :** La gravure de l'ITO permet d'isoler sur le substrat une bande non-conductrice (verre) et ainsi de s'affranchir des problèmes de courts circuits entre la cathode et l'anode lors de la prise des contacts. En effet, les contacts d'alimentation se faisant par pointe, ceux-ci peuvent facilement traverser la cathode et les différentes couches organiques jusqu'à l'anode. Il est donc important de pouvoir déposer une partie de la cathode directement sur le verre ou sur une surface organique exempte d'ITO[35].

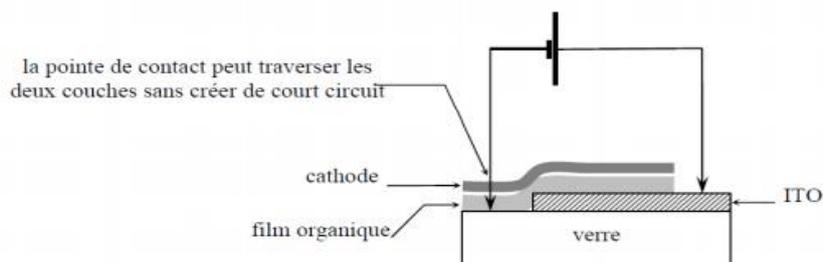


Figure II.21 : Intérêt de la gravure de la couche d'ITO. [35]

Le nettoyage chimique de l'échantillon gravé est ensuite procédé pour obtenir une surface sans impuretés (graisse, poussière, etc.). C'est une étape très importante dans la réalisation de l'OLED. En effet, ITO est important dans le vieillissement des équipements, et ainsi pour rendre la finition de surface possible. Le processus de nettoyage se compose de plusieurs étapes. L'échantillon passe successivement dans le bain à ultrasons suivant :

- L'éthanol agit sur les ultrasons pendant 10 minutes.
- Le rinçage par l'eau desionisée pendant 5 minutes sous ultrasons.
- Acétone sous échographie pendant 10 minutes.
- Le rinçage par l'eau desionisée pendant 5 minutes sous ultrasons.
- Isopropanol sous ultrasons pendant 5 minutes.

## II.10.2 Dépôt des couches organiques :

**II.10.2.1 Spin coating** : L'enduction centrifuge permet le dépôt, par voie liquide, de polymères ou de petites molécules. Le dépôt par voie humide est très étudié dans la fabrication de dispositifs électroniques à faibles coûts comportant des polymères. Il s'agit d'une technique de dépôt simple et facile d'utilisation.

Un substrat est posé sur une plaque munie d'un système d'aspiration en son centre. Il est ensuite recouvert d'une solution contenant le matériau à déposer. Le vide réalisé sous le substrat permet ainsi de le maintenir en place lors de la rotation de la plaque, permettant l'éjection du surplus de liquide par force centrifuge (Figure II.22). L'épaisseur de la couche obtenue est établie par le choix des paramètres de dépôt : accélération, vitesse et temps de la rotation [19].

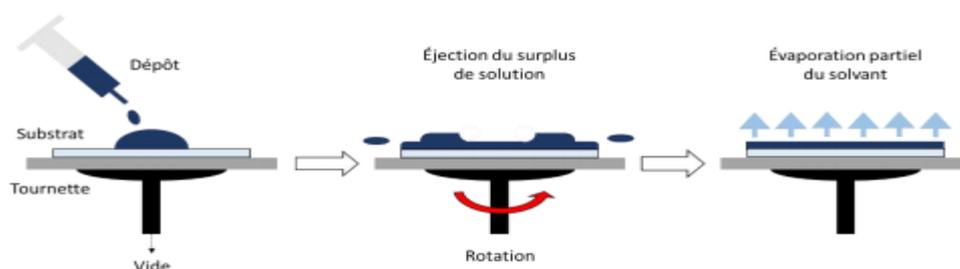
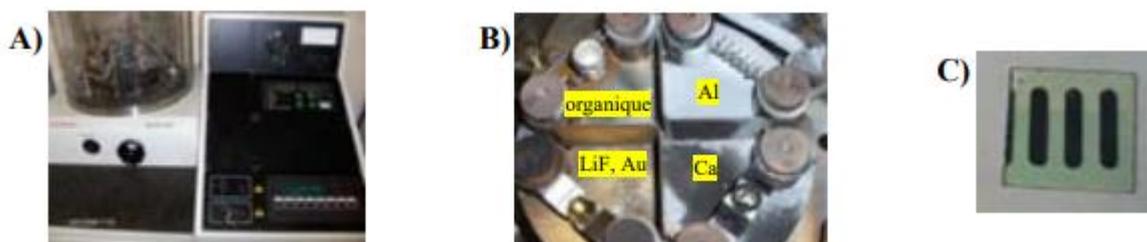


Figure II.22 : Illustration d'un dépôt par enduction centrifuge (ou spin coating) [19]

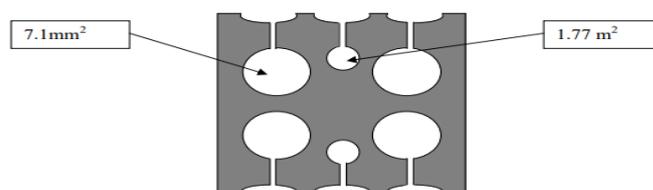
**II.10.2.2 Dépôt par évaporation sous vide :** Les molécules organiques à déposer selon le type de dispositif à étudier (monocouche ou multicouche) sont ensuite déposées par évaporation sous vide (**figure II.23.A**). Lors du dépôt, la pression dans la chambre d'évaporation peut varier de  $10^{-7}$  mbar à  $10^{-5}$  mbar maximum. L'épaisseur ainsi que la vitesse de dépôt sont contrôlées par l'intermédiaire d'une balance à quartz piézoélectrique située près des échantillons dans le bâti. [18]



**Figure II.23 :** A) Bâti d'évaporation sous vide. B) Photos des différents creusets utilisés pour évaporer les métaux et les molécules organiques. C) Echantillon terminé. La zone d'ITO qui a été gravée est visible sur la partie supérieure[18]

Les métaux utilisés en tant que cathode sont également déposés par évaporation sous vide dans des creusets adaptés au métal, et à travers un masque qui détermine la forme de l'OLED. **La figure II.23.B** montre les différents types de creusets adaptés à chaque matériau (organique ou métal). [18]

**II.10.3 Dépôt de la cathode :** Le dépôt de la cathode (Ca, Al, Ag) s'effectue également par sublimation. Contrairement au dépôt des couches organiques qui s'effectue sur toute la surface du substrat, le dépôt de la cathode se fait à travers un masque qui détermine la surface d'émission des diodes. Les différentes mesures effectuées au profilomètre ont montré que l'épaisseur de chaque couche métallique déposée était voisine de 100 nm [52]



**Figure II.24 :** Masque pour le dépôt de la cathode [52]

## II.11 Le simulateur GPVDM :

GPVDM est un modèle d'appareil optoélectronique 1D / 2D, qui peut être utilisé pour simuler des cellules solaires, des LED, des diodes, des FET, etc. Il résout les équations de diffusion de la dérive en utilisant la méthode de différence fini. Aussi, il résout les équations optiques à l'aide du lancer de rayons ou de la méthode de la matrice de transfert. Il est une multiplateforme / open source [58].

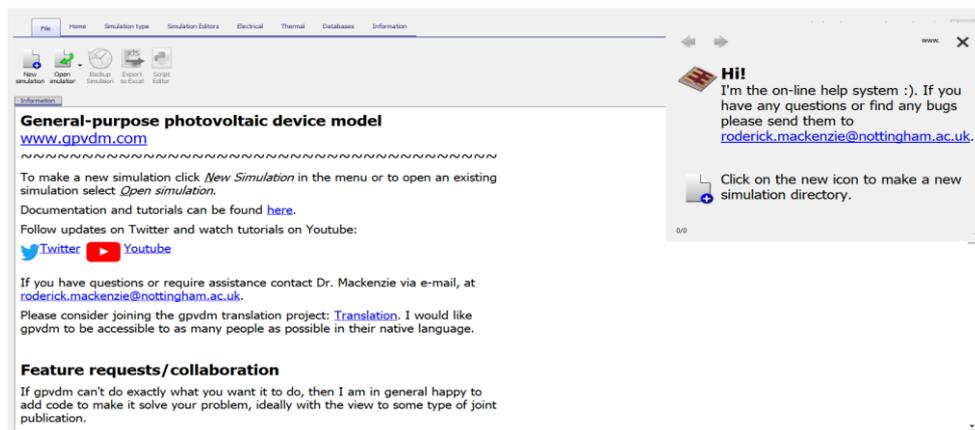


Figure II.25 : L'interface GPVDM

### II.11.1 Fenêtre de l'éditeur de couches (Layer Editor) :

Dans cette fenêtre est représenté le nom, l'épaisseur, et le matériau optique pour l'OLED utilisé. A travers, on peut modifier le matériau, épaisseur, et même l'ordre des couches.

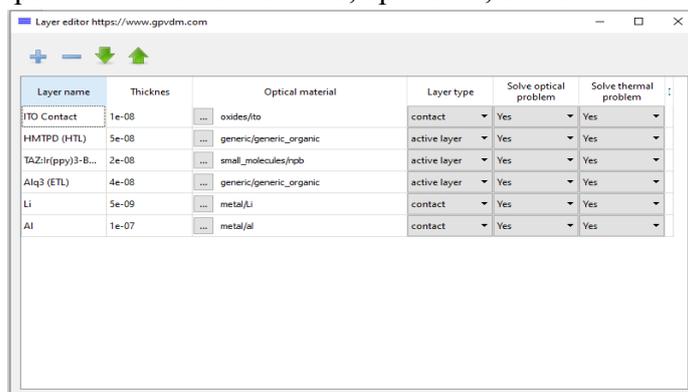


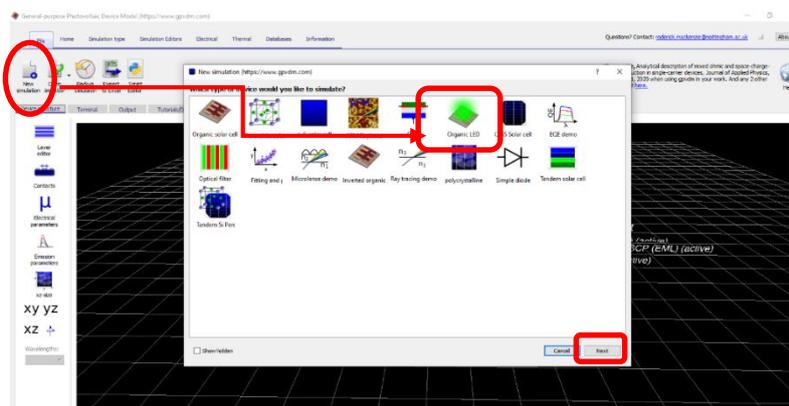
Figure II.26 : Fenêtre de l'éditeur de couches (Layer Editor)

Les équations optiques sont résolues sur toutes les couches. Cependant, si le calque est défini comme "couche actif", Alors GPVDM va également résoudre les équations électriques sur cette couche. Plusieurs couches peuvent être définies en tant que couche active. Dans ce cas, les équations électriques seront résolues de manière globale, les couches marquées "couche active", ce qui est utile lors de la simulation d'hétérojonctions. Un type de couche 'autre' signifie que les équations électriques ne seront pas résolues sur cette couche, mais les équations optiques le seront. Une couche de type contact indique que la couche représente une couche de contact. Ceci est seulement nécessaire pour les simulations 2D / 3D [6].

### II.11.2 Premier simulation de GPVDM :

- Cliquer sur « New simulation », puis choisir « Organic led » pour notre cas (cas d'OLED).

- Cliquez sur « Next ». [59]

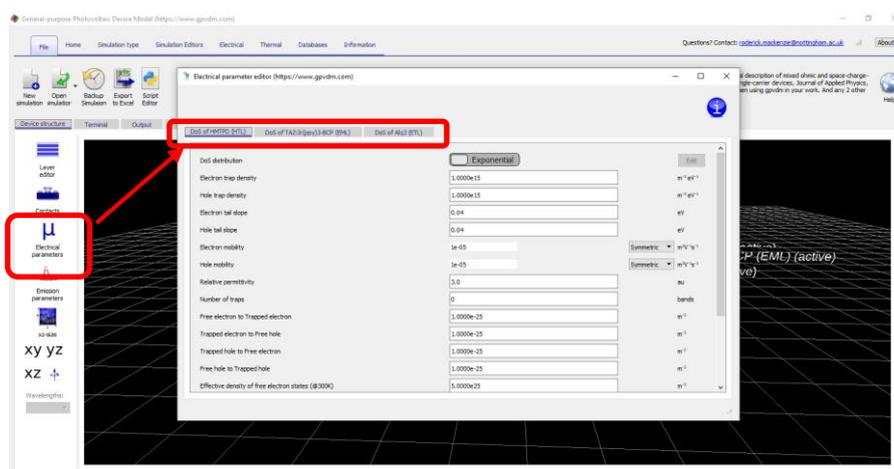


**Figure II.27 :** Le premier simulation GPVDM.

### II.11.3 Modification des paramètres électriques d'un matériau :

Clique sur « Electrecal parameters », sous l'appareil onglet structure.

Cette fenêtre permet de changer les paramètres électriques des couches actives.



**Figure II.28 :** Fenêtre de paramètres électriques des couches actives.

### II.11.4 Types de couches dans GPVDM :

**Le tableau 1.** Résume le type de calque, la description, et la résolution optoélectronique des calques

Type de calque	Description	Résolution électrique des équations	Résolution optique des équations
Active	Le modèle électrique est résolu sur ces calques, chaque calque possède son propre ensemble de paramètres électriques.	Oui	Oui
Autre	Aucune équation électrique n'est résolue dans ces couches.	Non	Oui
Contact	Ces couches permettent de définir les contacts, aucune équation électrique n'est résolue dans les couches.	Non	Oui

Tableau II.1 : Type de calque, description, et la résolution optoélectronique des calques [60]

## II.12 Simulation des OFETs et d'autres structures 2D :

GPVDM comprend un modèle électrique 2D qui lui permet d'être utilisé pour la simulation d'un transistor à effet de champ organique (OFET). Le modèle 2D comprend :

- Densités de charge arbitraires sur les contacts supérieurs ou inférieurs.
- Possibilité de définir autant de contacts top que souhaité.
- Algorithmes haute tension stables permettant de simuler des tensions supérieures à 200V.
- Possibilité de simuler des appareils aux dimensions très asymétriques, c'est-à-dire des transistors d'une longueur de 20 mm et d'une largeur de canal de 200 nm [61]

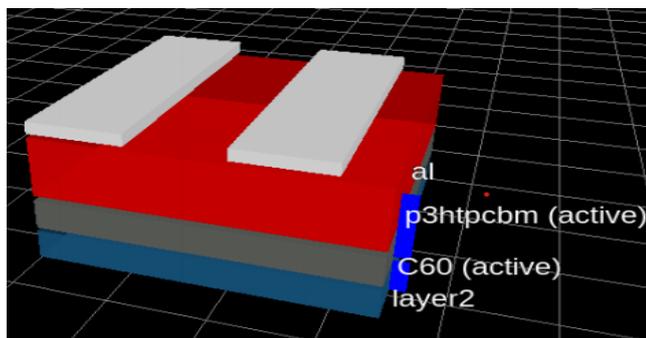
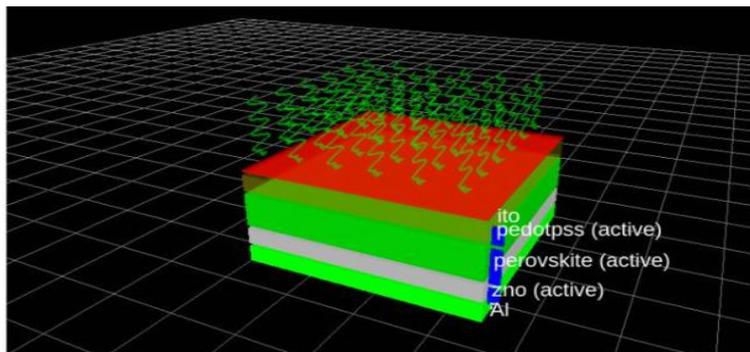


Figure II.29 : Simulation OFET (transistor à effet de champ organique) [61]

## II.13 Simulation de dispositifs pérovskites :

- GPVDM contient tous les modèles physiques nécessaires pour simuler des cellules solaires à pérovskite, à la fois dans le domaine permanent et temporel, notamment [62] :

- Les modèles avancés de diffusion de dérive.
- Les modèles optiques détaillés, connectés à une grande base de données de matériaux.
- Un solveur d'ions mobiles, regardez les ions mobiles se déplacer dans votre appareil lorsque vous appliquez des impulsions de lumière et de tension.
- Effectuer des balayages de tension dans le domaine à temps plein comme ils le seraient dans un laboratoire.
- Étudier les effets d'hystérésis
- Animer et tracer l'interaction des ions mobiles, des porteurs de charge et des photons dans le domaine temporel pour comprendre réellement pourquoi votre appareil fonctionne comme il le fait.



**Figure II.30** : Simulation de dispositifs pérovskites. [62]

## II.14 Modélisation diodes électroluminescentes organiques OLED :

### + Approches mathématiques :

Le modèle d'appareil photovoltaïque à usage général (GPVDM) est un logiciel à usage général gratuit pour les cellules OLED par une simulation basée sur la résolution de la loi de Gauss (II.1) et les équations de diffusion de dérive bipolaire (II.2, II.3) et le porteur équations de continuité (II. 4, II. 5) en 1D et en domaine temporel [6].

- **Loi de Gauss : [59]**

$$\nabla \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \nabla \Phi = q(n-p) \quad \text{II.1}$$

$\epsilon_0$  : La permittivité de l'espace libre

$\epsilon_r$  : La permittivité relative

$\Phi$  : Le profil de tension

$q$  : La charge élémentaire sur un électron

$n$  : La concentration d'électrons libres

$p$  : La concentration de trou libre .

- **Termes de conduite des électrons [59]**

$$J_n = q \mu_e n \nabla E_c + q D_n \nabla n \quad \text{II.2}$$

$J_n$  : la densité de flux de courant électronique

$\mu_e$  : la mobilité des électrons

$E_c$  : le bord libre de mobilité des électrons  
 $D_n$  : le coefficient de diffusion électronique .

- Termes de conduite des trous : [59]

$$J_p = q \mu_h p \nabla E_v + q D_p \nabla p \quad \text{II.3}$$

$J_p$  : La densité de flux de trou  
 $\mu_h$  : La mobilité des trous  
 $E_v$  : Le bord libre de mobilité de trou  
 $D_p$  : Le coefficient de diffusion du trou.

- Equation de continuité électronique [59] :

$$\nabla \cdot J_n = q \left( R_n + T_n + \frac{\partial n_{\text{free}}}{\partial t} \right) \quad \text{II.4}$$

$R_n$  : Est le taux de recombinaison nette pour les électrons  
 $n_{\text{free}}$  : Les électrons libres.

- Equation de continuité de trou [59]

$$\nabla \cdot J_p = - q \left( R_p + T_p + \frac{\partial p_{\text{free}}}{\partial t} \right) \quad \text{II.5}$$

$R_p$  : Est le taux de recombinaison nette des trous  
 $p_{\text{free}}$  : Les trous libres

À cet égard, GPVDM est similaire à de nombreux autres modèles d'appareils. Ceci est souvent fait en utilisant ce qui l'équation SRH, qui suppose une stabilité répartition de l'état de la charge piégée porte dans les états pièges [59].

$$R_T = \frac{np - n_i^2}{\tau_{p0} \left[ n + n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \right] + \tau_{n0} \left[ p + n_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right) \right]} \quad \text{II.6}$$

La forme de l'équation SRH n'est pas adaptée pour simulations dans le domaine temporel où piégeage / recombinaison via les états de piège dominant la dynamique de charge. En tant que porteurs de charge ne peut pas sortir de l'équilibre [59].

**Nous devons donc résoudre la densité de charge de chaque état de piège explicitement.**

- L'espace énergétique est divisé en tranches d'énergie.
- Les équations SRH sont utilisées et résolues dans le domaine temporel.

Chaque état de trap a son propre taux équation [57]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = r_1 - r_2 - r_3 + r_4 \quad \text{II.7}$$

$r_1$  : Capture d'électrons.  
 $r_2$  : Émission d'électrons

$r_3$ : Capture de trous.

$r_4$ : Émission de trou.

Recombinaison peut être calculé comme :

➤ **Recombinaison de porteurs libres [59]**

$$R_n = \sum_0^{n_{band}} (r_1^e - r_2^e) \quad \text{II.8}$$

**II.15 Etude des propriétés optiques et électriques :**

**II.15.1 Simulation des dispositifs OLED (Tandem et Bulk)**

**1) OLED Bulk :**

un dispositif électroluminescent organique (OLED) sur un substrat, où l'OLED a une anode transparente, une couche de transport d'électrons (ETL) qui est dopée avec une substance phosphorescente matériau, et une cathode. Des modes de travaux spécifiques comprennent l'utilisation d'un oxadiazole à substitution aryle, d'un triazole à substitution aryle, d'une phénanthroline à substitution aryle, d'un composé benzoxazole ou benzthiazole comme premier ETL qui est utilisé comme hôte pour le matériau dopant phosphorescent émissif. Lorsque le côté cathode est le plus proche du substrat, l'OLED est considérée comme inversée [63].

Ces couches possèdent une épaisseur d'une dizaine à une centaine de nanomètres. Elles sont déposées sur un substrat épais, une plaque de verre dans la plupart des cas. L'une des deux électrodes doit être transparente. L'ITO (Indium Tin Oxide) est bien connu comme anode car il satisfait aux trois milieux : transparence, conductivité et adéquation, connu pour sa bonne injection, et de son travail de sortie au niveau HOMO de la plupart des semi-conducteurs organiques. En effet, le travail de sortie de l'anode doit être proche de l'HOMO, et celui de la cathode du LUMO du matériau électroluminescent. Le dépôt de l'ITO sera fait par évaporation sous vide. Pour la cathode le choix peut être porté sur l'Aluminium et le Lithium, qui sont les métaux les plus utilisées dans les diodes électroluminescentes organiques [17].

Il s'agit, dans ce travail de considérer un matériau hôte ETL composé d'un matériau 3-(biphényl-4-yl)-5-(4-tertbutylphényl)-4-phényl-4H-1,2,4-triazole (TAZ). En tant que mode de réalisation représentatif de la présente invention, le matériau dopant phosphorescent émissif peut être du fac-tris (2-phénylpyridine) indium (Ir(ppy)3) en se référant à la référence [63].

➤ **Paramètres de la diode électroluminescente organique OLED (Bulk) :**

Nom du dispositif	Epaisseur (nm)	Matériau optique
ITO	20	Oxyde/ito
TAZ:Ir(ppy)3 (EML)	60	small_molecules/npb
Li	10	metal/li
Al	20	metal/al

**Tableau II.2 :** Différentes calques d'OLED Bulk.

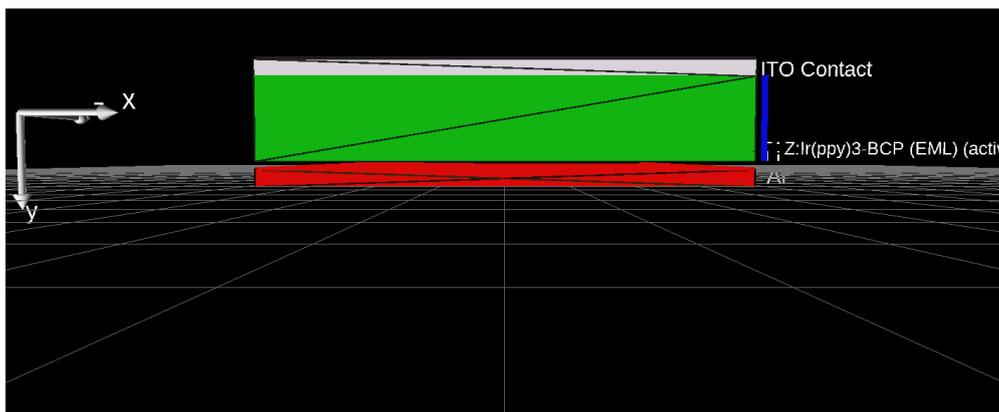


Figure II.31 : Dispositif OLED Bulk par GPVDM.

2) OLED Tandem :

Afin de mieux comprendre les différences de performances de chacun des deux modèles(Tandem et Bulk), nous avons conservé la même structure d’OLED Bulk pour l’OLED en Tandem et n’avons ajouté que deux couches qui sont :

- La couche de transport de trous (HTL) en matériau de HMTDP (N, N, N', N'-Tetrakis(3-methylphenyl) -3,3' dimethylbenzidine)
- Couche de transport d’électrons (ETL) en Alq<sub>3</sub> (tris(8-hydroxyquinoléine) aluminium(III)).

Paramètres de la diode électroluminescente organique OLED (Tandem) :

Nom du dispositif	épaisseur (nm)	Matériau optique
ITO	20	Oxyde/ito
HMTDP (HTL)	50	generic/generic_organic
TAZ:Ir(ppy)3 (EML)	60	small_molecules/npb
Alq3 (ETL)	40	generic/generic_organic
Li	10	metal/li
Al	20	metal/al

Tableau II.3 : Différentes calques d’OLED Tandem.

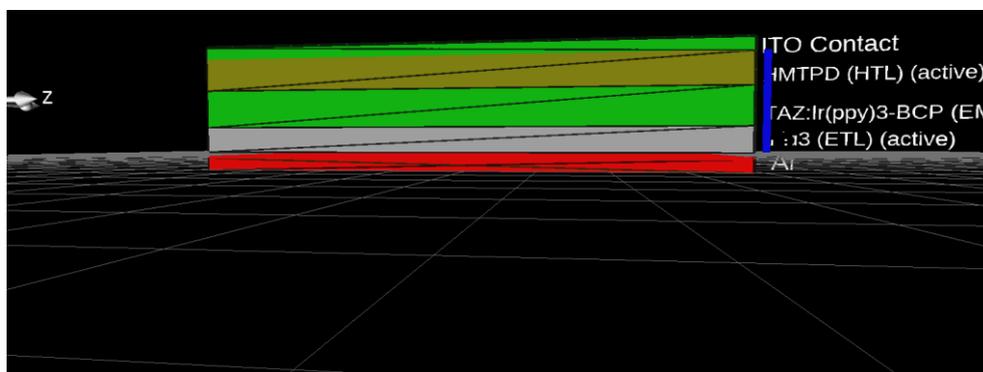


Figure II.32 : Structure d’OLED Tandem par GPVDM.

## **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons identifié les différentes structures de la diode électroluminescente organique OLED, en commençant par la structure la plus simple (monocouche) qui est constituée d'une seule couche, puis la structure bicouche (double couche), et enfin la structure multicouche la plus efficace car elle contient de nombreuses couches.

OLED a connu de nombreux développements et à titre de les preuves les différentes technologies (TOLED, FOLED, AMOLED, PMOLED...etc) qui se présentent. Ce qui facilite le développement rapide dans divers secteurs (l'affichage et l'éclairage).

Pour que l'OLED soit efficace, les matériaux organiques qui entrent dans sa composition doivent être soigneusement sélectionnés, en tenant compte des différents procédés des dépôts utilisés.

Dans ce chapitre, nous avons également appris à connaître un logiciel GPVDM et ses fonctionnements, en mentionnant certains dispositifs électroniques (OFETs, Cellules pérovskites ...etc.).

# **Chapitre III**

## **Simulation et propriétés optiques et électriques des OLEDs (Tandem et Bulk)**

### III.1 Introduction :

Ce chapitre présente la simulation de deux diodes électroluminescentes organiques (OLED Tandem et Bulk) à base d'anode en oxyde d'indium et d'étain (ITO) à l'aide du logiciel GPVDM.

Les paramètres

La modélisation électrique et optique du dispositif OLED combinée aux paramètres entrés et considérant les propriétés moléculaires et la morphologie de la simulation permet de concevoir un modèle OLED performant [15].

### III.2 Résultats et discussions :

➤ Résultats de simulation OLED Bulk et Tandem :

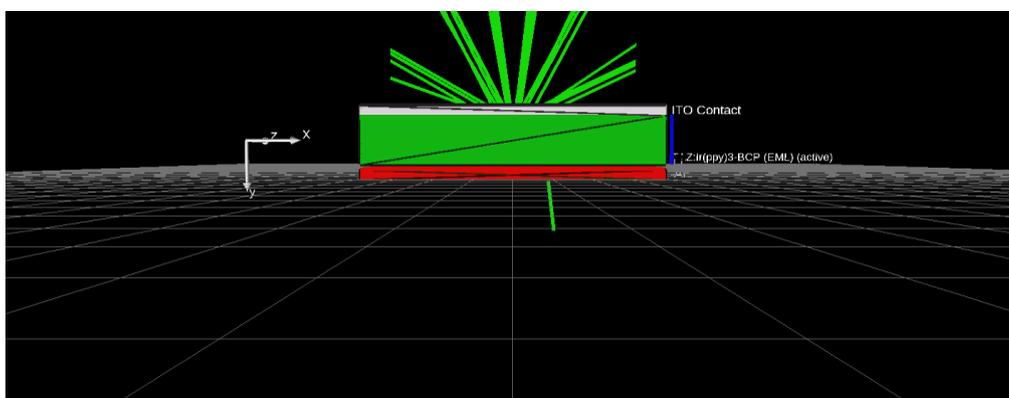


Figure III.1 : Résultats de simulation OLED Bulk.

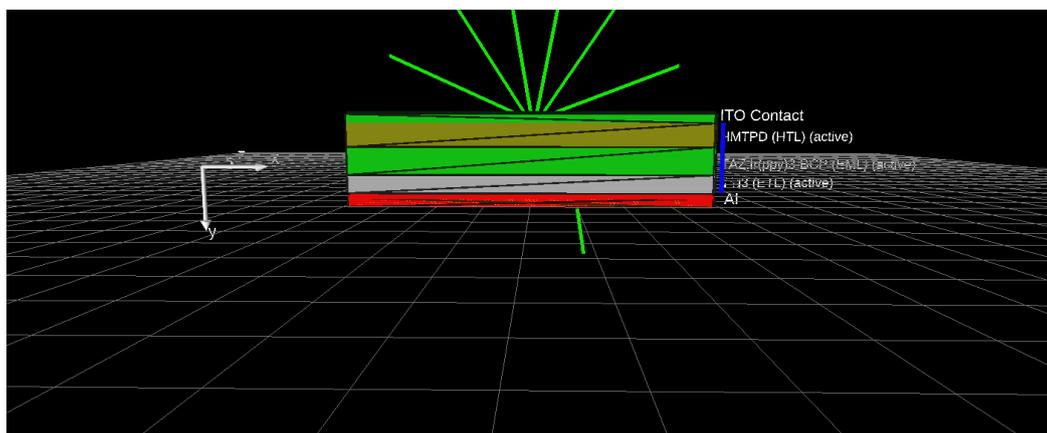


Figure III.2 : Résultats de simulation OLED Tandem.

D'après les figures (Figure III.12, Figure III.12) qui représentent l'émission de photons à travers l'OLED Bulk et Tandem, on constate que le dispositif de type **ITO/TAZ : Ir(ppy)3/Li-Al (Bulk)** a une émission plus importante par rapport au dispositif **ITO/HMTPD/TAZ : Ir(ppy)3/Alq3/Li-Al (Tandem)**

### III.7.2.2 Propriétés électriques :

La simulation du dispositif via le logiciel GPVDM nous donne les différentes propriétés électriques.

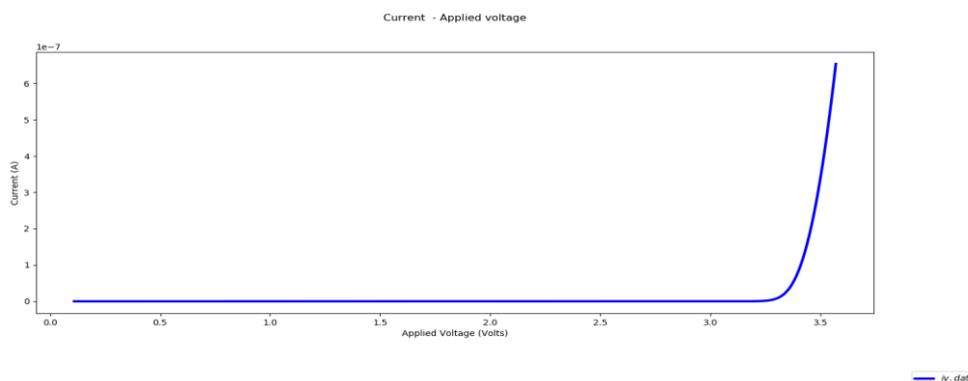


Figure III.3 : Caractéristiques I-V d'OLED Bulk

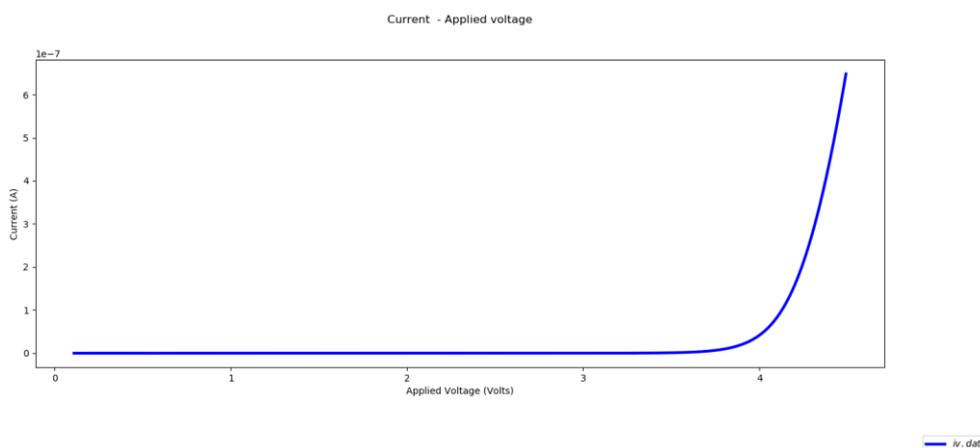
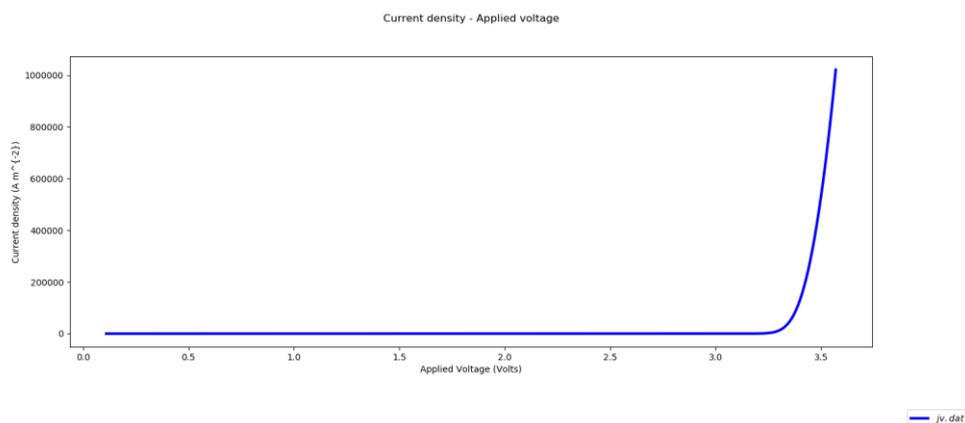


Figure III.4 : Caractéristiques I-V d'OLED Tandem

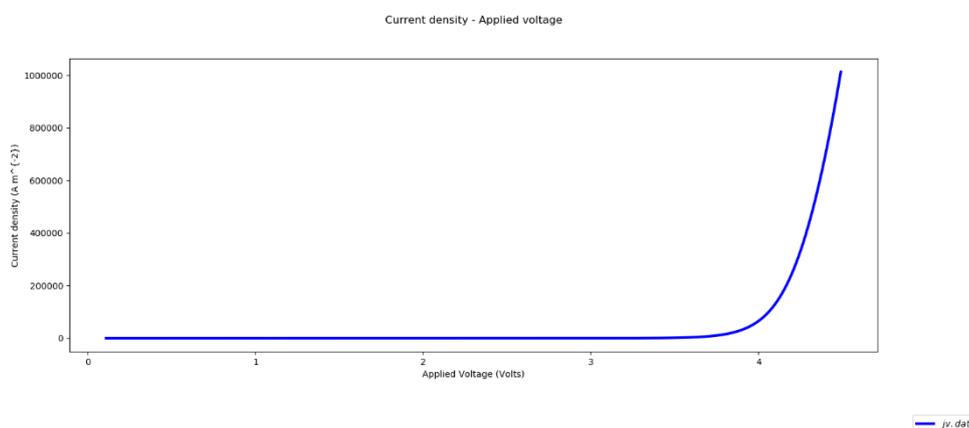
D'après la **figure III.3** et la **figure III.4** qui représentent la variation de courant parcouru en fonction de tension appliquée pour les deux structures d'OLED Bulk et Tandem, nous remarquons que ;

- Avant la tension de seuil ; le courant est nul quel que soit l'augmentation de la tension appliquée cela est dû au porteur le plus mobile (possédant une mobilité élevée (trou)) qui peut alors traverser l'ensemble de la structure sans rencontrer de porteur de signe opposé. Cette situation gaspille de l'énergie et affecte l'efficacité de la conversion électrique en énergie optique [17].
- A la tension de seuil (de l'ordre 3,3V pour l'OLED Bulk et de l'ordre de 3,8V pour l'OLED Tandem), le courant est augmenté jusqu'à atteindre sa valeur maximale pour une tension de l'ordre de 5V, indiquant une injection efficace de porteurs de charge et leur transport sous l'effet de la tension [17]. tandis que pour l'OLED Tandem la circulation de courant est moins retardée par rapport à Bulk sous une même tension appliquée.

Ce décalage montre que la diode sans couche de transport de trous (HMTPD) assure le passage d'une densité de courant plus élevée que celle ayant le HMTPD. Ceci peut être expliqué par le fait que les électrons sont bloqués à l'interface HMTPD/TAZ : Ir(ppy)<sub>3</sub> à cause d'une barrière ce qui favorise leur recombinaison avec les trous dans la couche active de TAZ : Ir(ppy)<sub>3</sub>. Egalement, la mobilité des trous dans la couche de HMTPD est inférieure à celle des électrons dans l'Alq<sub>3</sub> ce qui améliore la balance d'injection des porteurs dans la couche active. En effet, sous un champ électrique donné, les diodes avec HMTPD donnent une densité de courant plus faible et donc un courant plus élevé que celles sans HMTPD [17].



**Figure III.5** : caractéristiques J-V d'OLED Bulk



**Figure III.6**: Caractéristiques J-V d'OLED Tandem

La **figure III.5** et la **figure III.6** représentent la variation de densité de courant en fonction de la tension appliquée de la structure simulée (OLED Bulk et Tandem).

Ces courbes montrent qu'il y existe le même comportement pour la densité de courant par rapport au courant parcouru pour OLED Bulk et Tandem. Ce décalage est dû au parcours lent du courant le long de la surface de Tandem à cause de l'introduction des couches de transport (Alq<sub>3</sub> et HMTPD).

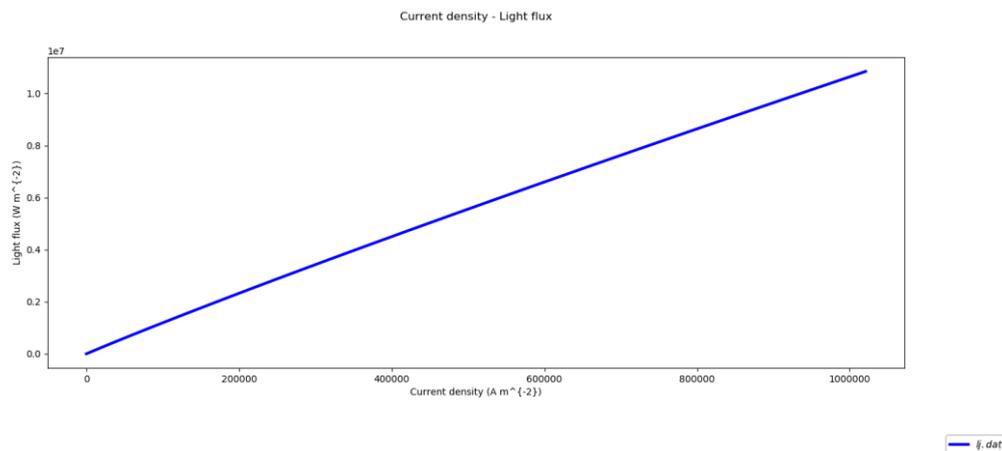


Figure III.7 : Caractéristiques L-J d’OLED Bulk

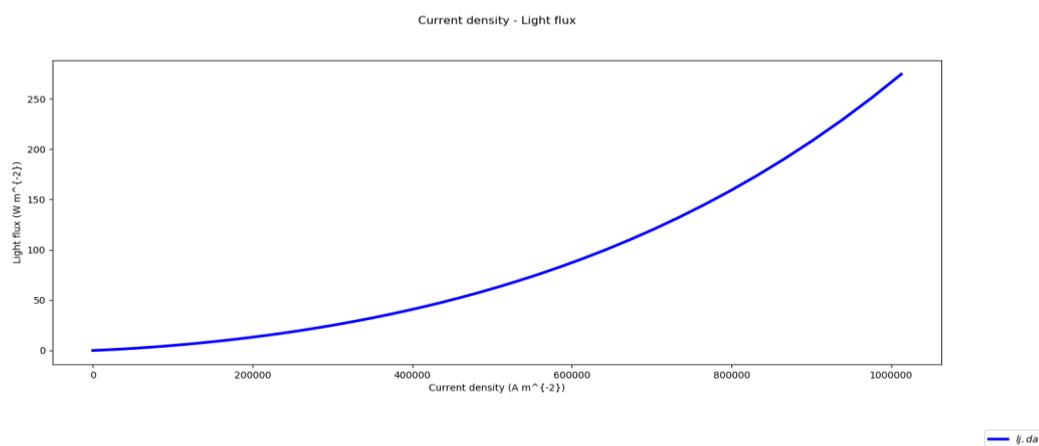


Figure III.8 : Caractéristiques L-J d’OLED Tandem

D’après les deux figures (Figure III.7 et Figure III.8) de caractéristiques L-J d’OLED Tandem et Bulk, on note que :

- Le flux lumineux est directement proportionnel à la densité de charge
- Pour OLED Bulk le flux augmente linéairement avec la densité du courant jusqu’à atteindre une valeur maximale d’environ  $1 \text{ e}^7 \text{ W. m}^{-2}$  pour une valeur de densité du courant  $1 \text{ e}^6 \text{ A. m}^{-2}$ . Tandis que dans l’OLED Tandem il augmente de façon exponentielle et atteint sa valeur maximale de flux lumineux d’environ  $270 \text{ W. m}^{-2}$  pour une valeur de densité du courant  $1 \text{ e}^6 \text{ A. m}^{-2}$ , donc il est très en retard par rapport au Bulk.
- Cette différences entre ces deux résultats est due à l’addition des deux couches de transport (Alq3 et HMTPD) ,ce qui a entraîné un retard dans la recombinaison des polarons et donc un retard dans le flux lumineux.

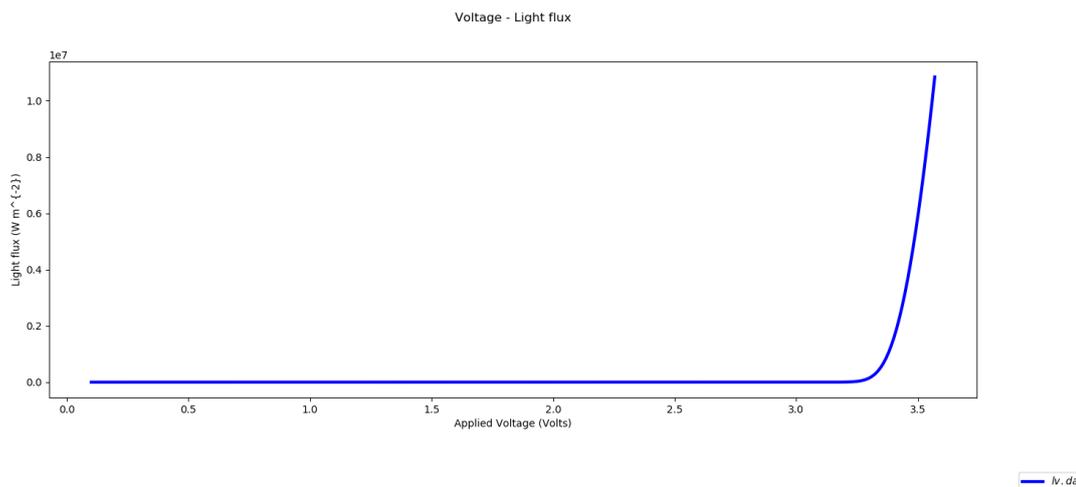


Figure III.9 : Caractéristiques L-V d’OLED Bulk

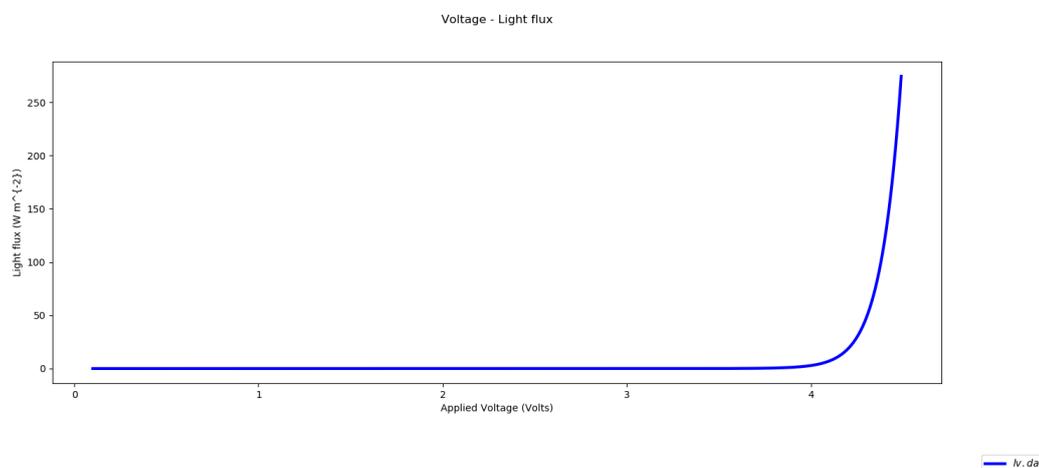


Figure III.10 : Caractéristiques L-V d’OLED Tandem

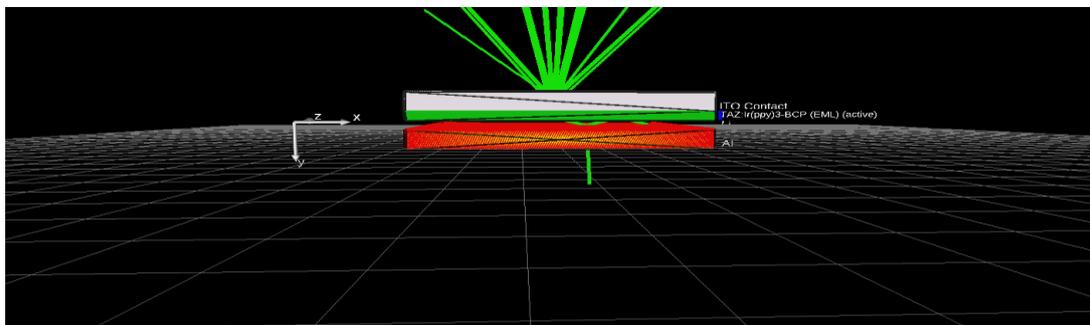
D’après la **Figure III.9** et **Figure III.10** caractéristiques L-V d’OLED Tandem et Bulk, on note que :

- Le flux lumineux est nul avant la tension de seuil.
- Quand on atteint la tension de seuil dans l’OLED Bulk (d’environ 3,3V) et l’OLED Tandem (d’environ 4,4V), il y a une valeur minimale de flux.
- Après la tension de seuil il y a une augmentation importante de flux lumineux mais l’OLED Tandem reste en retard par rapport à l’OLED Bulk.

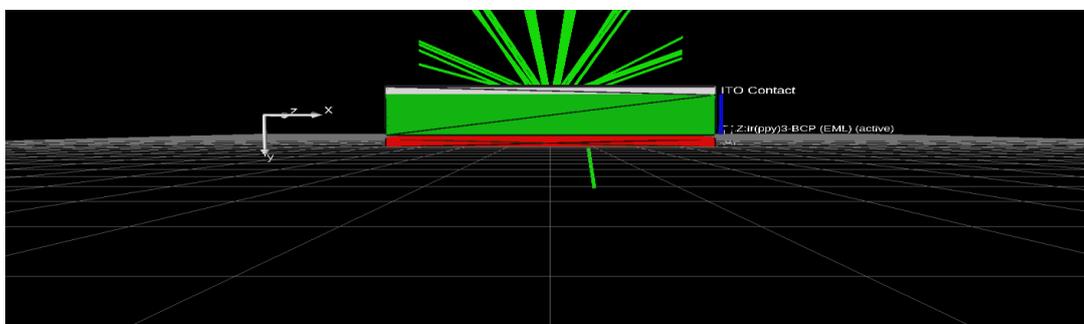
### III.3 Influence de l’épaisseur de couche émissive sur la performance d’OLED:

#### III.8.1 Dispositif étudié :

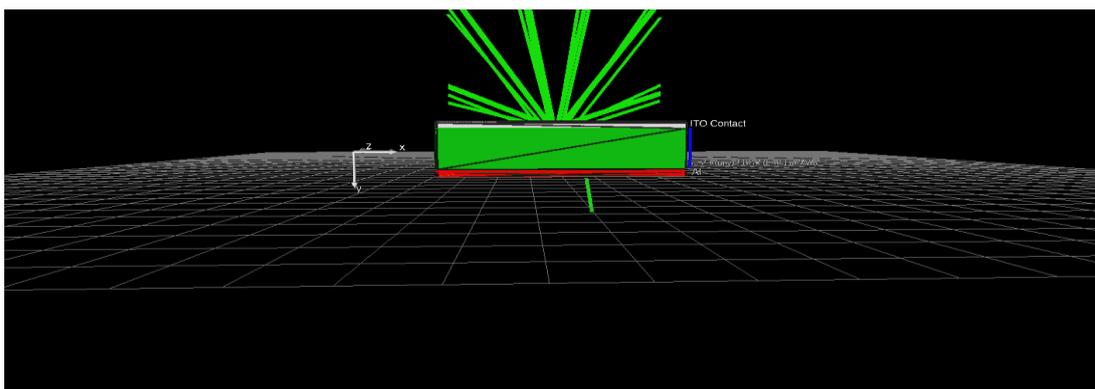
On utilise pour cette simulation l’OLED Bulk parce qu’il est performant par rapport à l’OLED Tandem. Pour avoir l’influence de la couche émissive TAZ : Ir(ppy)<sub>3</sub> sur la performance d’OLED, on fait varier l’épaisseur de cette dernière entre 10 et 150 nm.



**Figure III.11:** Emission de lumière pour une épaisseur de 10 nm



**Figure III.12 :** Emission de lumière pour une épaisseur de 60 nm



**Figure III.13 :** Emission de lumière pour une épaisseur de 150 nm

D’après les figures (III.11, III.12, III.13) qui montrent l’émission de la lumière d’OLED Bulk pour différentes épaisseurs (de 10,60,15 nm successives), on constate que :

La lumière est inversement proportionnelle à l'épaisseur, ou l'on remarque que plus l'épaisseur est grande, plus elle devient inefficace, et cela dû à l'élargissement de la zone de recombinaison, et à partir de là l'interaction entre les polarons est diminuée.

### III.3.1 Propriétés électriques :

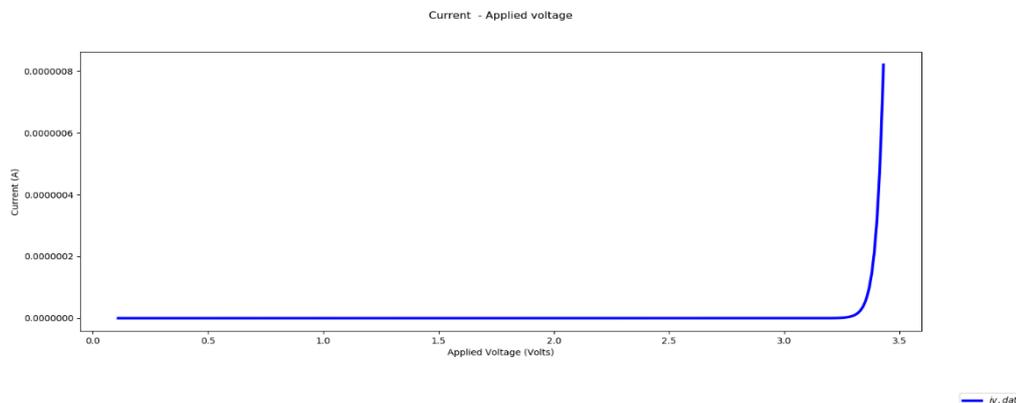


Figure III.14 : Caractéristiques I-V (épaisseur de 10 nm)

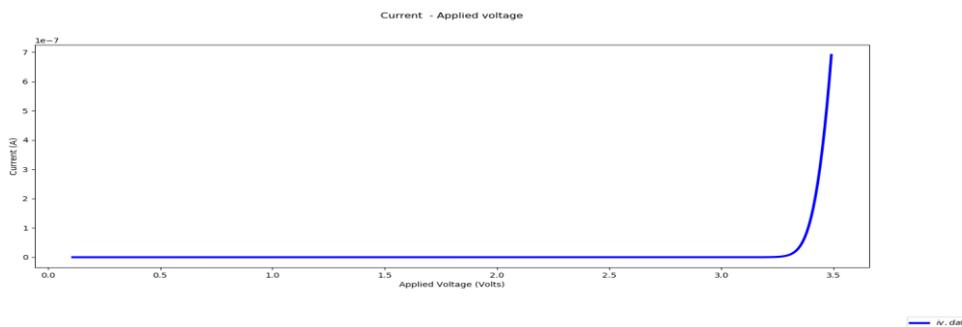


Figure III.15 : Caractéristiques I-V (épaisseur de 60 nm)

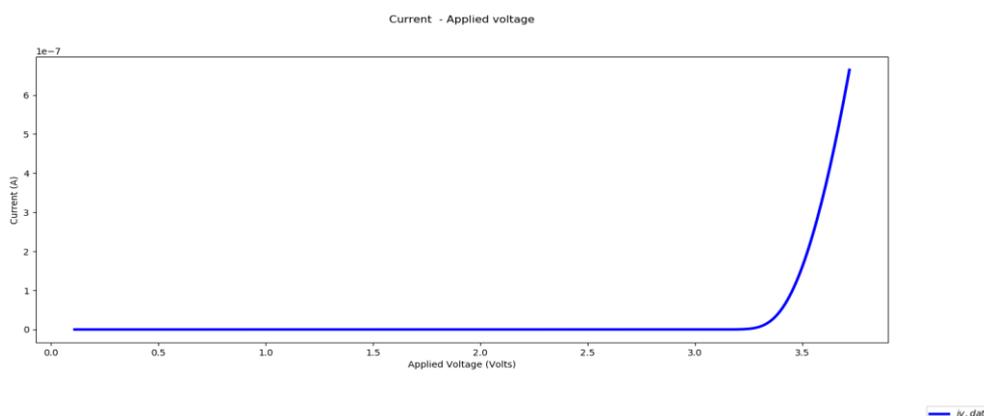


Figure III.16 : Caractéristiques I-V (épaisseur de 150 nm)

D'après les figures (Figure III.14, Figure III.15, Figure III.16) qui montrent la variation de courant en fonction de tension appliquée, on constate que le courant parcouru par OLED Bulk augmente lentement au fur et à mesure que l'épaisseur de la couche émissive TAZ Ir(ppy)<sub>3</sub> augmente, de sorte que pour une tension appliquée de 3,4V nous avons un courant de l'ordre de  $8e^{-7}$  A pour l'épaisseur de 10 nm et de l'ordre de  $4 e^{-7}$  A pour l'épaisseur de 60 nm et d'environ  $0,6 e^{-7}$  A pour l'épaisseur de 150 nm .

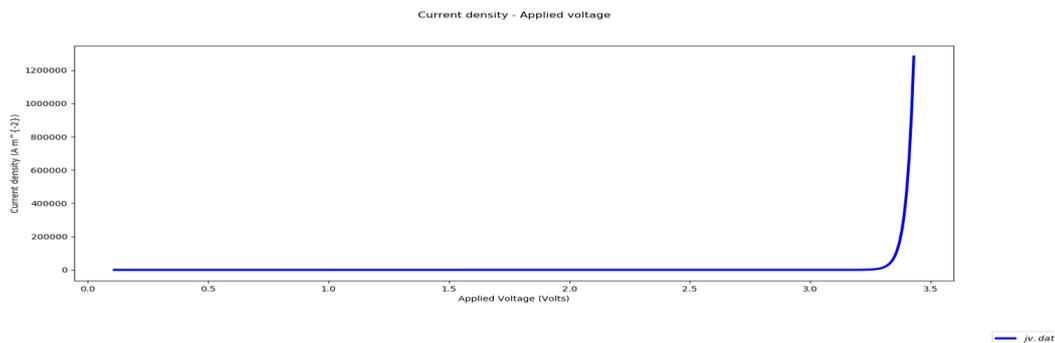


Figure III.17 : Caractéristiques J-V (épaisseur de 10 nm)

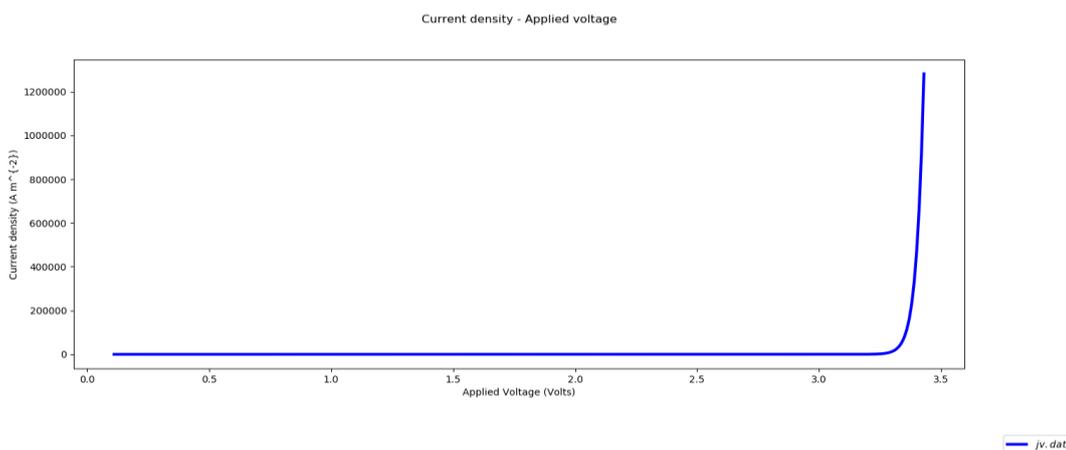


Figure III.18 : Caractéristiques J-V (épaisseur de 60 nm)

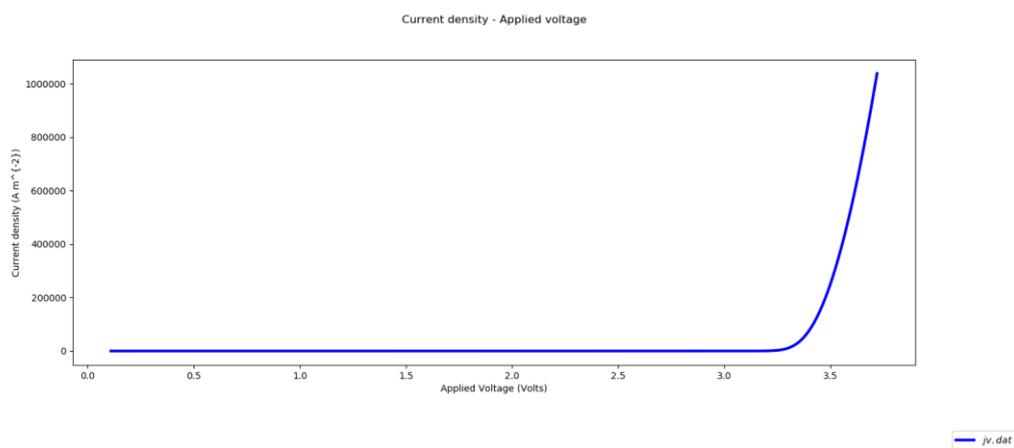


Figure III.19 : Caractéristiques J-V (épaisseur de 150 nm)

D'après les figures (Figure III.17, Figure III.18, Figure III.19) qui montrent la variation de la densité de courant en fonction de tension appliquée, on constate que pour une tension appliquée de 3,4V nous avons un densité de courant de l'ordre  $8e^5 \text{ A m}^{-2}$  pour l'épaisseur de 10 nm et de l'ordre de  $6e^5 \text{ A m}^{-2}$  pour l'épaisseur de 60 nm et d'environ  $5e^4 \text{ A m}^{-2}$  pour l'épaisseur de 150 nm ,ce décalage est due à l'élargissement de la zone d'interaction avec l'augmentation de l'épaisseur ,ce qui ralentit le passage du courant le long de la surface d'OLED

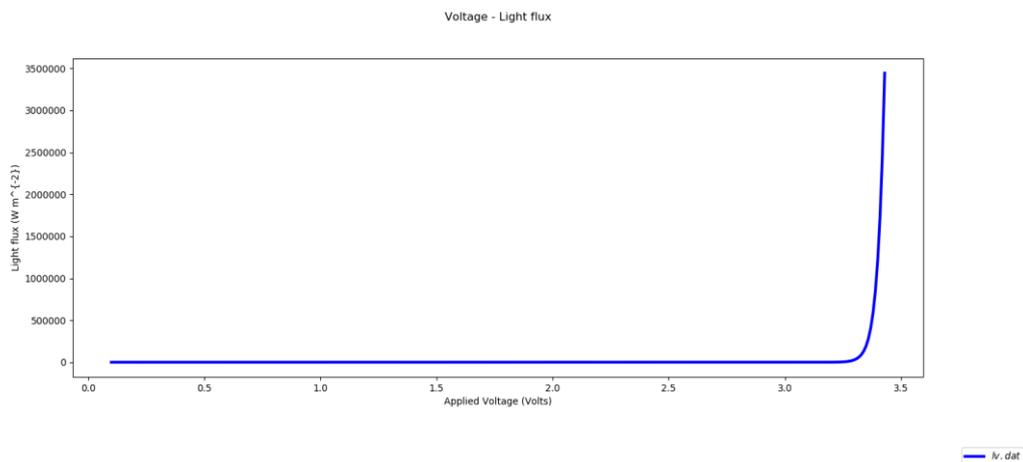


Figure III.20 : Caractéristiques L-V (épaisseur de 10 nm)

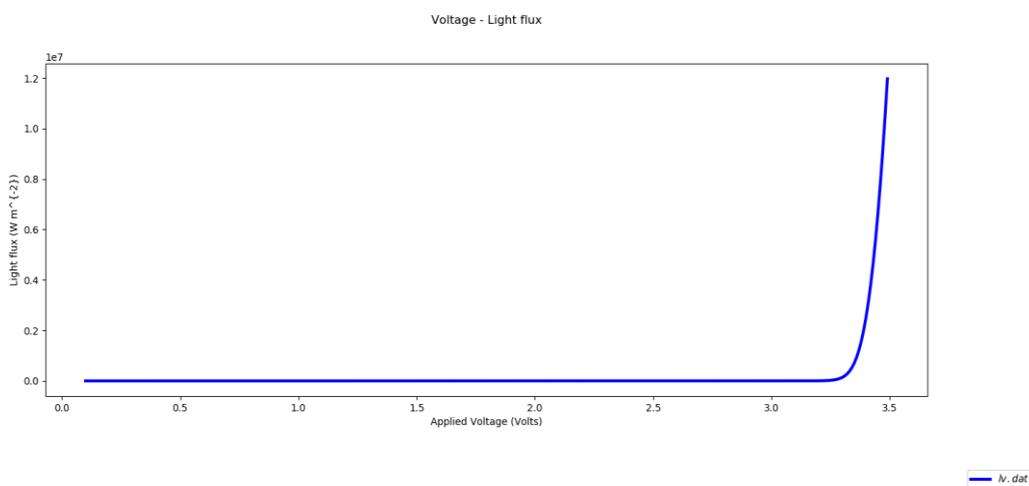


Figure III.21 : Caractéristiques L-V (épaisseur de 60 nm)

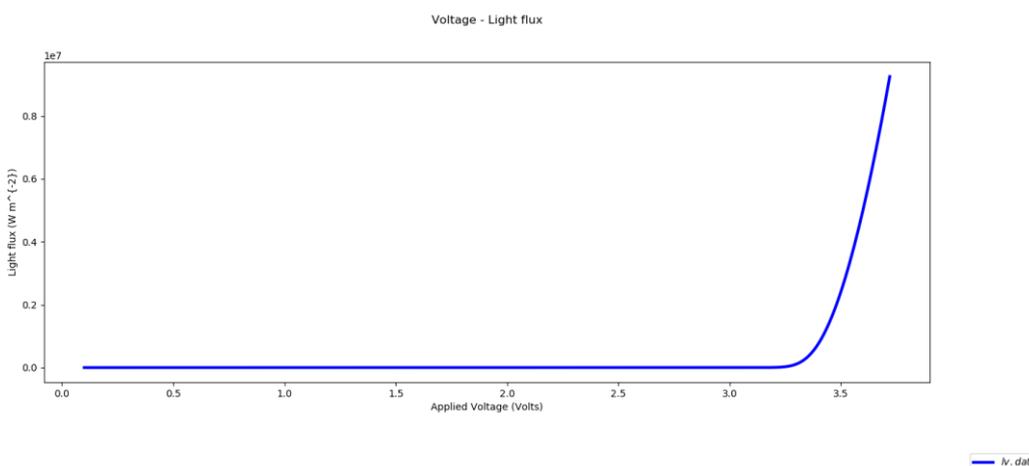


Figure III.22 : Caractéristiques L-V (épaisseur de 150 nm)

D'après les figures (Figure III.20, Figure III.21, Figure III.22) qui montrent la variation du flux lumineux en fonction de tension appliquée, on constate que pour une tension appliquée de 3,4V nous avons un flux lumineux de l'ordre  $8e^5 \text{ A m}^{-2}$  pour une épaisseur de 10 nm, il est de l'ordre de  $6e^5 \text{ A m}^{-2}$ , pour l'épaisseur de 60 nm et il est d'environ  $5e^4 \text{ A m}^{-2}$  pour l'épaisseur de 150 nm.

Ce décalage est dû au passage lent du courant, et donc la tension appliquée diminue.

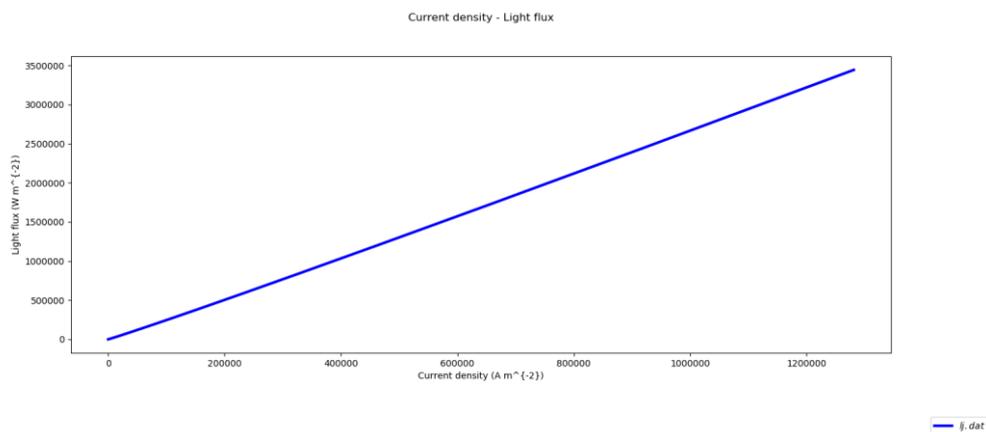


Figure III.23 : Caractéristiques L-J (épaisseur de 10 nm)

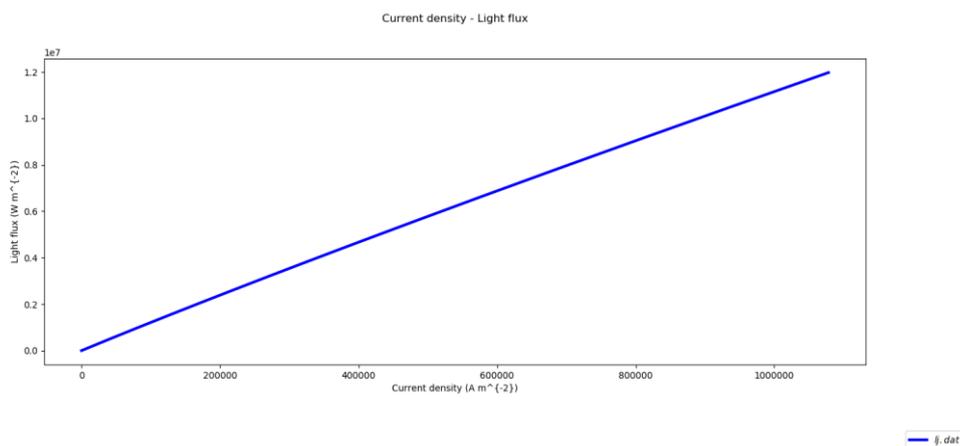


Figure III.24 : Caractéristiques L-J (épaisseur de 60 nm)

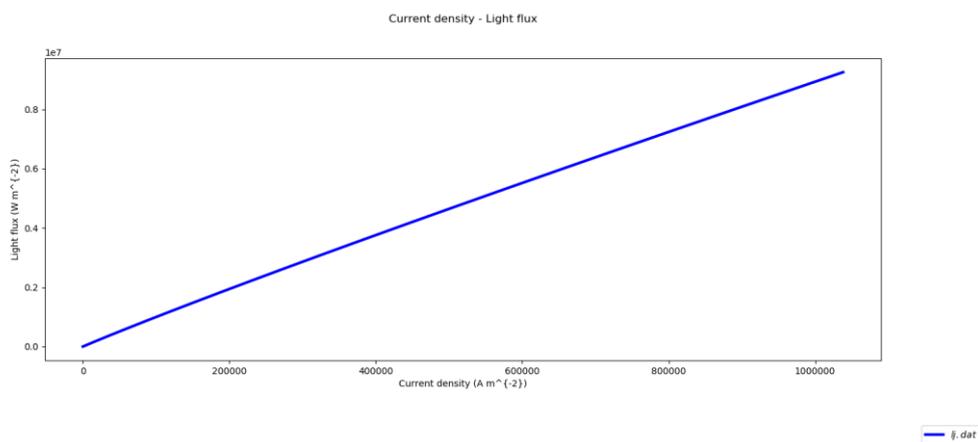


Figure III.25 : Caractéristiques L-J (épaisseur de 150 nm)

D'après les figures (Figure III.23, Figure III.24, Figure III.25) qui montrent la variation de flux lumineux en fonction de densité de courant, on constate que pour une densité de courant

de  $1e^6 \text{ A m}^{-2}$  nous avons un flux lumineux de l'ordre  $2,6e^6 \text{ W m}^{-2}$  pour une épaisseur de 10 nm, quant à l'épaisseur de 60 nm il est de l'ordre de  $1,17e^7 \text{ W m}^{-2}$  alors que pour l'épaisseur de 150 nm il est d'environ  $0,9e^7 \text{ W m}^{-2}$ . Cette différence peut être due au passage lent du courant le long de la surface d'OLED du fait de l'augmentation de l'épaisseur de la couche émissive ce qui ralentit, donc le flux lumineux de l'OLED.

### III.4 Propriétés optiques :

#### III.4.1 Influence de l'anode sur la performance d'OLED :

##### ❖ Distribution de photons :

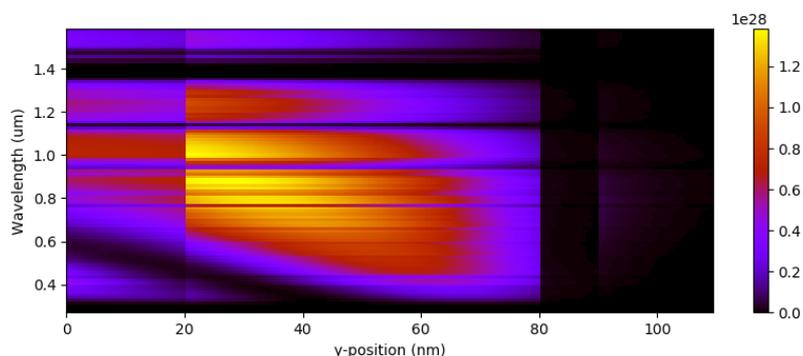


Figure III.26 : Distribution de photons à travers l'OLED Bulk à base d'anode ITO

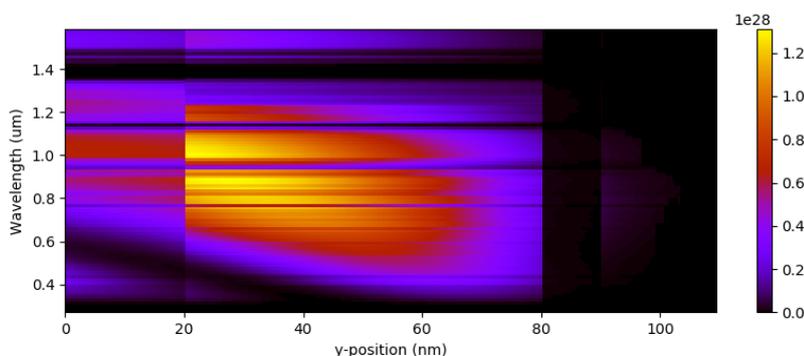


Figure III.27 : Distribution de photons à travers l'OLED Bulk à base d'anode ZnO

D'après les figures (Figure III.26, Figure III.27) qui montrent la distribution de photons générées à partir d'OLED Bulk à base d'anode ITO et ZnO respectivement, on constate que :

La première figure (Figure III.26) est plus lumineuse que la seconde (Figure III.27) dans toutes les régions (Anode, couche émissive, cathode) et surtout dans la couche émissive, ce qui signifie que la distribution de photons pour l'OLED à base ITO est plus importante par rapport à son homologue en ZnO et cela est dû à l'anode en ITO.

❖ Densité de photons :

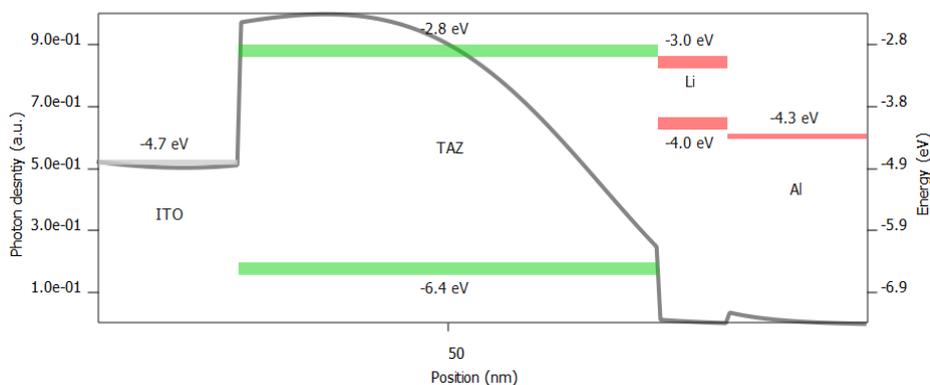


Figure III.28 : Densité de photons à travers l’OLED Bulk à base d’anode ITO

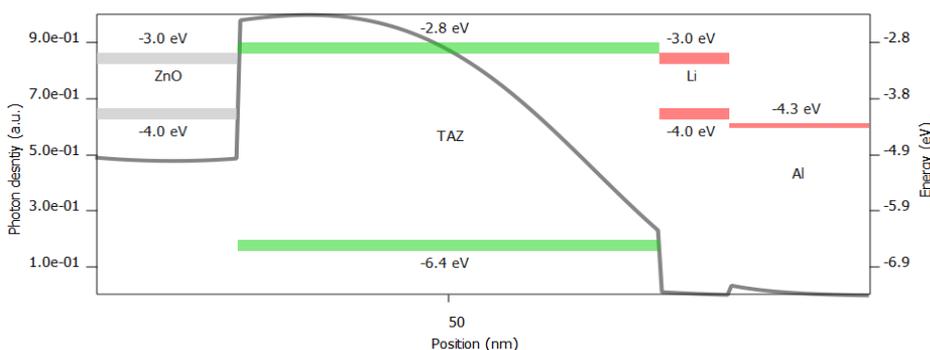


Figure III.29 : Densité de photons à travers l’OLED Bulk à base d’anode ZnO

Les figures (Figure III.28, Figure III.29) montrent la densité de photons émis par OLED Bulk à base d’anode ITO et ZnO respectivement. On constate que :

- Dans la région de l’anode, la densité de photons pour l’OLED Bulk à base d’anode ITO est grande par rapport à celle de photons à base de ZnO et cela aide au transfert efficace de charge au niveau de la couche de ITO –TAZ : Ir(ppy)<sub>3</sub>.

Cette différence de densité des photons peut être expliquée par ce qui suit:

- Dans la région de l’anode, l’anode ITO et ZnO ont des travaux de sortie différents ou le premier est de travail de sortie d’environ 4,7 eV et le deuxième est de travail de sortie d’environ 3 eV, donc ITO a un travail de sortie plus grand, c’est donc le plus efficace.

❖ Taux de génération :

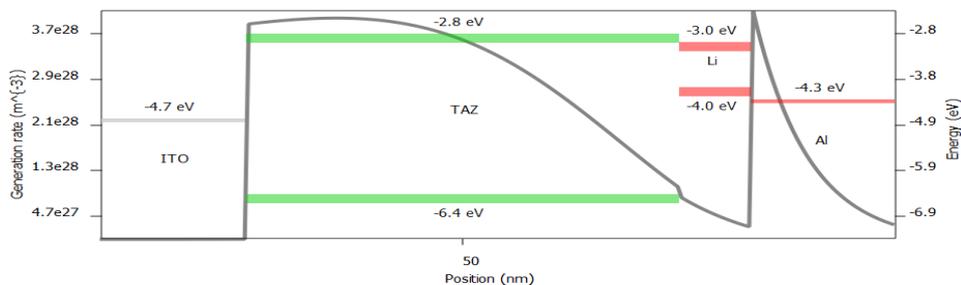


Figure III.30 : Taux de génération de photons à travers l’OLED Bulk à base d’anode ITO

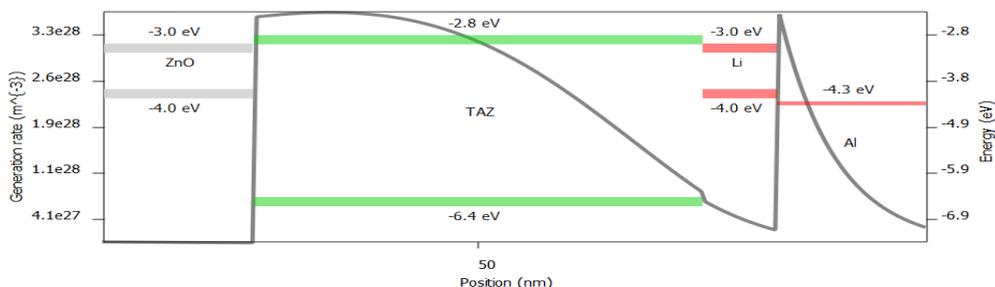


Figure III.31 : Taux de génération de photons à travers l’OLED Bulk à base d’anode ZnO

D’après les figures (Figure III.30, Figure III.31) qui montrent le taux de génération de photons émis par OLED Bulk à base d’anode ITO et ZnO respectivement, on constate que :

- Dans la région de l’anode : le taux de génération est nul pour l’anode ITO et ZnO, en raison du manque d’accès à la recombinaison.
- Dans la région de la couche émissive : le taux de génération pour l’OLED Bulk à base de ITO est plus grande par rapport à celle à base de ZnO et cela est dû à l’augmentation de densité de photons constatée dans les deux courbes précédentes (Figure III.28, Figure III.29), cela nous assure qu’il y a une injection efficace dans l’interface ITO/TAZ : Ir(ppy).

### III.4.2 Influence de la cathode sur la performance d’OLED :

#### ❖ Distribution de photons :

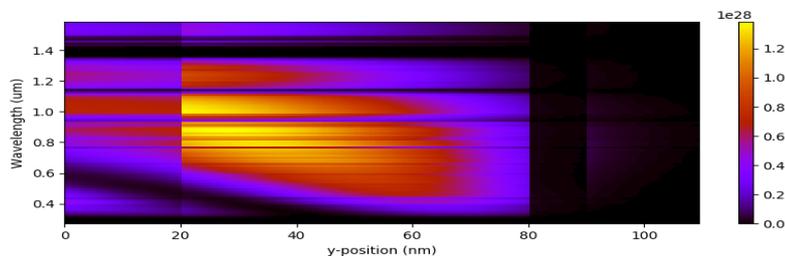


Figure III.32 : Distribution de photons à travers l’OLED Bulk à base de cathode Al

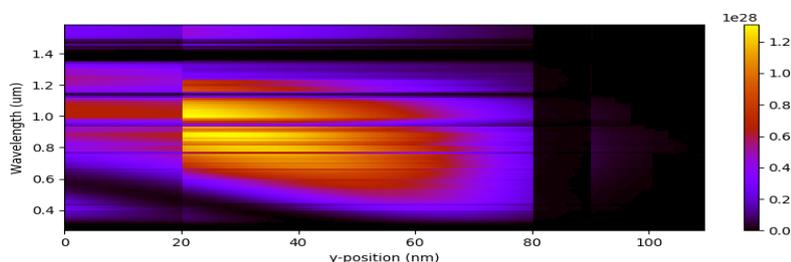


Figure III.33 : Distribution de photons à travers l’OLED Bulk à base de cathode Au

D’après les figures (Figure III.32, Figure III.33) qui montrent la distribution de photons générées à partir d’OLED Bulk à base de cathode Al et Au respectivement, on constate que :

- La première figure (Figure III.32) est plus lumineuse que la seconde (Figure III.33) dans toutes les régions (Anode, couche émissive, cathode) et surtout dans la couche émissive et la cathode, ce qui signifie que la distribution de photons pour l’OLED à base de Al est plus importante par rapport à son homologue en Au.

#### ❖ Densité de photon :

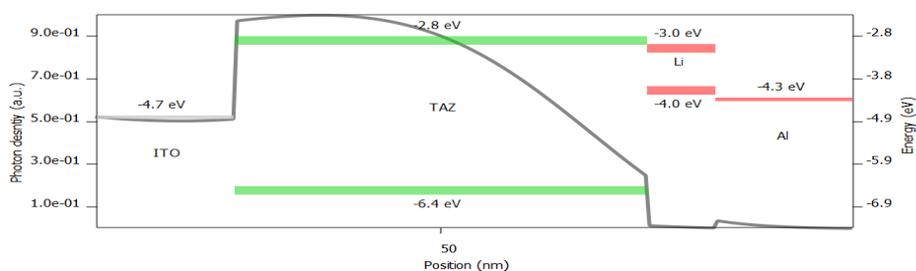
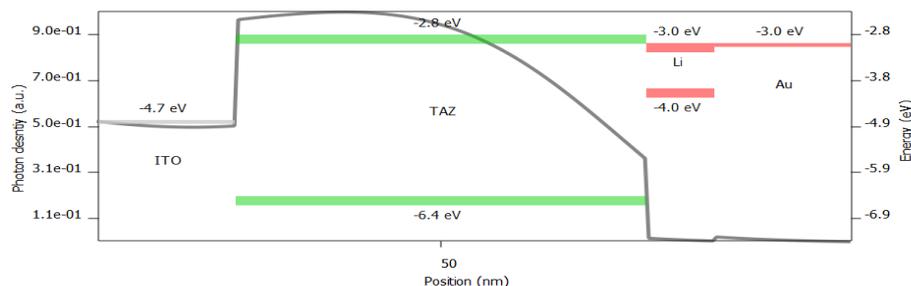


Figure III.34 : Densité de photons à travers l’OLED Bulk à base de cathode Al

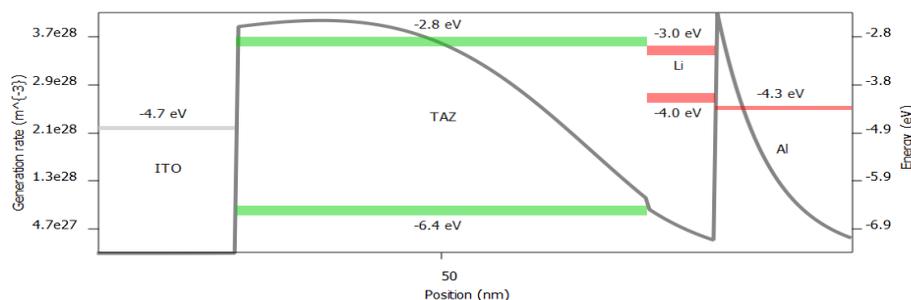


**Figure III.35 :** Densité de photons à travers l’OLED Bulk à base de cathode Au

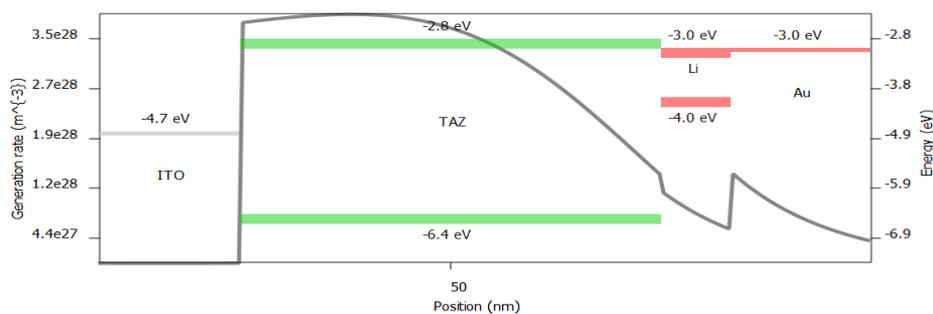
D’après les figures (**Figure III.34**, **Figure III.35**) qui montrent la densité de photons émis par OLED Bulk à base de la cathode Al et Au respectivement, on constate que :

- Dans la région de la cathode, il est clair que la cathode en Al a un travail de sortie d’environ 4,3 eV qui est donc différent par rapport à la cathode en Au qui a un travail de sortie d’environ 3,0 eV, et puisque le travail de sortie pour la cathode Al est grand, cela confirme que la cathode Al est performante par rapport à la cathode Au (cas de l’OLED inversée).

❖ **Taux de génération :**



**Figure III.36 :** Taux de génération de photons à travers l’OLED Bulk à base de cathode Al



**Figure III.37 :** Taux de génération de photons à travers l’OLED Bulk à base de cathode Au

D’après les figures (**Figure III.36**, **Figure III.37**) qui montrent le taux de génération de photons émis par OLED Bulk à base de cathode Al et Au respectivement, on constate que :

- Partant de l'anode, on remarque que le taux de génération est nul. Pour la couche émissive on a un taux de génération maximum résultant du contact entre les travaux de sortie des électrodes et les deux niveaux d'énergie HOMO, LUMO de couche émissive, puis il diminue progressivement en traduisant le phénomène d'électroluminescence, ensuite il augmente d'une valeur significative (pour la cathode Al) par rapport à la cathode Au jusqu'à indiquer l'émission du photon à travers elle, et ce qui montre que la cathode Al est performant. Cela est dû à l'injection efficace d'électrons dans l'interface **Al/TAZ :Ir(ppy)3**.

### **III.5 Conclusion :**

- Dans ce chapitre nous avons simulé deux dispositifs différents d'OLED (Bulk et Tandem) à l'aide de logiciel de simulation : GPVDM.
- D'après les résultats électriques de simulation de nos dispositifs (Tandem et Bulk), nous concluons que l'OLED de type **ITO/TAZ : Ir(ppy)3/Li-Al (Bulk)** est performant par rapport à celle de **ITO/HMTPD/TAZ : Ir(ppy)3/Alq3/Li-Al (Tandem)**.
- Les résultats optiques de simulation montrent que le changement d'épaisseur de la couche émissive (**TAZ :Ir(ppy)3**) ainsi que le changement des électrodes (anode, cathode) influencent les performances d'une cellule OLED.

# **Conclusions générale et Perspectives**

### **Conclusion générale :**

Dans le cadre de ce mémoire de fin d'études, nous nous sommes intéressés à au cellules OLED. Dans ce type de cellules, les TCO (Oxyde Transparents Conducteur) utilisés présentent un bon compromis entre transparence optique et bonne conductivité électrique. L'oxyde de zinc ZnO, InO<sub>3</sub> et SnO<sub>2</sub> ont été utilisés comme électrodes transparentes dans les cellules OLED pour leur bonne conductivité électrique combinée à une transparence élevée. Nos résultats montrent que le meilleur matériau est le (InO<sub>3</sub>+SnO<sub>2</sub>).

D'autre part, nos résultats indiquent que la couche d'oxyde transparent TCO joue un rôle très important dans l'électroluminescence de notre structure, avec ses propriétés optiques, notre structure a un rendement intéressant. Nous avons analysé l'influence de l'épaisseur de la couche active, ainsi que de la réflexion de la couche de TCO sur les performances des OLED.

Compte tenu de ces résultats, les cellules solaires de type **ITO/ TAZ : Ir(ppy)<sub>3</sub> /Li-Al** présentent un bon compromis rendement de conversion et peuvent ainsi permettre des applications potentielles en grandes surfaces.

### **Perspectives :**

- Ce travail ouvre la voie à de riches perspectives de recherche dans le domaine des OLED par l'étude et l'utilisation d'autres TCO (structure complexe).
- Bien que l'OLED Tandem soit capable de produire une lumière mono et polychromatique (lumière blanche), et contrairement à l'OLED Bulk monocouche qui produit qu'une lumière monochromatique, la simulation a montré que le Bulk est plus efficace que le Tandem. Ceci peut être dû à la déficience de la structure Tandem. Cela nous motive à l'avenir à travailler sur le développement d'une OLED en Tandem multicouche à base de couches bloquantes de porteurs de charges.

---

## *Références*

- [1] A. Singh, D. Mehta and P. Baldua "Flexible electronics - organic light emitting diodes (OLED)", Project Report, pp. 1–40, 2018.
- [2] F. Fortier, « Étude de performance et de vieillissement d ' un dispositif OLED », Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, 2017.
- [3] M. Hissler, "Les diodes électroluminescentes organiques : technologies et performances," Photoniques, no. 68, pp. 35–38, 2013, doi: 10.1051/photon/20136835.
- [4] S. Janfaoui, "Electronique CMOS en silicium microcristallin sur substrat flexible transparent", Thèse, Université De Rennes 1, 2012.
- [5] L. Akdim, "Comparaison de méthodes d'adsorption et d'encapsulation de l'huile essentielle de copaifera officinalis l. en vue d'une application en cosmétique", mémoire, Université Gembloux Agro-Bio Tech, 2017.
- [6] S. Bensenouci , " Etude de l'efficacité de conversion des cellules solaires organiques à base de polymères conjugués P3HT : PCBM", Mémoire de master, Université de TLEMEN, 2019
- [7] M. Devynck, " Transistors organiques à effet de champ. Etude des interfaces et améliorations des performances" Thèse, Université Bordeaux 1, 2012.
- [8] S. Bebiche, "OTFTs de type N à base de semiconducteurs  $\pi$ -conjugués : fabrication , performance et stabilité", Thèse, Université de Rennes 1, 2016.
- [9] H. Choukri, "Contrôle de la couleur d ' émission d ' une Diode Electro-Luminescente Organique ( OLED ) multicouche via la diffusion des excitons" ,Thèse, Université Paris 13,2008.
- [10] A. Alchaddoud, "Etude du comportement électrique et photométrique des diodes électroluminescentes organiques pour l ' éclairage ayant subi un vieillissement accéléré",Thèse, Université de Toulouse 3, 2017.
- [11] K. Bouzid, "Développement des outils et méthodes de conception d ' empilements OLED, vers une modélisation prédictive", Thèse, Université de Grenoble,2014.
- [12] S. Dalila, "L ' effet d ' interfaces électrodes couche active sur les performances de la cellule solaire organique à base de P3HT :PCBM", Mémoire de master , Université de Tizi-Ouzou, 2013.
- [13] S. J. F. Byrnes, "Basic theory and phenomenology of polarons," pp. 2–6, 2008.
- [14] K.Benatia " Etude des propriétés électriques et optiques des diodes électroluminescentes organiques « OLED » a base de films minces en polymère",Thèse, Université de Constantine 1,2018
- [15] Hani KANAAN , "Spectroscopie d'électro-absorption appliquée aux diodes électroluminescentes (OLEDs) et aux cellules photovoltaïques organiques (OPVs)",Thèse, Université Toulouse III,2009

- 
- [16] CHIME Alex Chamberlain, "Etude théorique et expérimentale de micro-OLEDs rapides sur électrodes coplanaires en régime d'impulsions à haute densité de courant", Thèse, Université Paris 13, 2017.
- [17] Mohamed Ben Khalifa, "Thèse Etude du transport et ingénierie de bandes dans les diodes organiques électroluminescentes à hétérostructures", Thèse Ecole Centrale de Lyon, 2004.
- [18] Nolwenn HUBY, "Optimisation des performances d'OLEDs à base de dérivés du silole par le contrôle des structures moléculaire et supramoléculaire", Thèse, Université de Bordeaux 1, 2006.
- [19] Benoît Blondel, "Complexes de platine (II) pour des diodes organiques électroluminescentes (OLEDs) rouges et bistables" : HAL Id : tel-01963215", Thèse, Université Toulouse, 2017.
- [20] A. Ghلامي, A. L. Calixte, L. N. Amer, and P. De Physique, "La fascinante beauté des LEDs," pp. 1–15, 2012.
- [21] J. Brodeur, "stratégies pour la conception de diodes électroluminescentes organiques hautement efficaces," mémoire, Université de Montréal, 2018.
- [22] O. Photonique, "Composants optoélectroniques."
- [23] <https://www.edinst.com/organic-light-emitting-diode/> ,06/06/2021
- [24] <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/pholed> , 06/06/2021
- [25] <https://slideplayer.fr/slide/3693470/> ,07/06/2021
- [26] Fraunhofer Institute Tests OLEDs for Light Therapy - LEDinside , 07/06/2021
- [27] S. Forge, C. Blackman, and S. Lindmark, Plastic promises: The disruptive potential of OLEDs and e-paper for the European display industry, vol. 11, no. 3. 2009.
- [28] <https://www.lesechos.fr/2004/03/les-equipements-du-combattant-du-futur-634165> ,05/06/2021
- [29] D. Vaufrey, "Réalisation d'OLED à émission par la surface : Optimisation de structures ITO / semiconducteurs organiques," pp. 1–196, 2003.
- [30] T. Chiba, D. Kumagai, K. Udagawa, Y. Watanabe, and J. Kido, "Dual mode OPV-OLED device with photovoltaic and light-emitting functionalities," Sci. Rep., vol. 8, no. 1, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-29806-8.
- [31] <https://www.cours-gratuit.com/cours-electronique-de-puissance/support-de-cours-pdf-sur-les-diodes-electroluminescentes-organique> ,06/06/2021
- [32] <https://www.meilleure-innovation.com/definition-oled/> ,04/06/2021
- [33] <https://edwardsrailcar.com/la-technologie/televiseurs-oled-avantages-et-inconvenients-de-la/> ,04/06/2021

- 
- [34] <https://blog.but.fr/article/ecran-oled-vs-lcd-le-duel/> ,10/06/2021, organique sous ATLAS-SILVACO”, mémoire de Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ,2018
- [35] Belabbas Lamia - Belabbas Ounissa, “Simulation d’une diode électroluminescente organique sous ATLAS-SILVACO”, mémoire, Université Tizi-Ouzou ,2018.
- [36] T. You, N. To, and K. About, “Transparent oled ebook.”
- [37] [https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-diagram-of-multilayer-structure-of-OLED\\_fig2\\_221909245](https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-diagram-of-multilayer-structure-of-OLED_fig2_221909245) , 07/06/2021
- [38] Luc BÉAUR, “ Propriétés excitoniques de puits quantiques ZnO/(Zn,Mg)O”, Thèse, Université Montpellier 2 , Sciences Et Techniques Du Languedoc,2011
- [39] R. Algerienne and D. Et, “Étude quanto-chimique des propriétés électroniques et optiques des composés oxadiazoliques à propriétés électroluminescentes (OLED),” 2020.
- [40] B. S. Kim, H. Chae, H. K. Chung, and S. M. Cho, “Electrical and optical analyses of tandem organic light-emitting diodes with organic charge-generation layer,” AIP Adv., vol. 8, no. 6, 2018, doi: 10.1063/1.5026880.
- [41] R. Biswas, “Simulations of emission from microcavity tandem organic light-emitting diodes,” J. Photonics Energy, vol. 1, no. 1, p. 011016, 2011, doi: 10.1117/1.3552947.
- [42] P. Xiao, J. Huang, Y. Yu, and B. Liu, “Recent developments in tandem white organic light-emitting diodes,” Molecules, vol. 24, no. 1, pp. 1–27, 2019, doi: 10.3390/molecules24010151.
- [43] <https://www.planar.com/media/438042/ebook-transparent-oled-4-19.pdf> ,05/06/2021
- [44] J. H. Han et al., “Transparent OLED lighting panel design using two-dimensional OLED circuit modeling,” ETRI J., vol. 35, no. 4, pp. 559–565, 2013, doi: 10.4218/etrij.13.1912.0020.
- [45] [https://www.researchgate.net/figure/Transparent-OLED-structure\\_fig5\\_308332988](https://www.researchgate.net/figure/Transparent-OLED-structure_fig5_308332988) ,06/06/2021
- [46] Types of OLEDs: Passive and Active Matrix - OLED Types | HowStuffWorks ,06/06/2021
- [47] <https://oled.com/oleds/flexible-oleds-foleds/> ,05/06/2021
- [48] [https://www.novaled.com/oleds/future\\_of\\_oleds/](https://www.novaled.com/oleds/future_of_oleds/) ,07/06/2021
- [49] 55 inch OLED Transparent Screen GDOB5500CT Specification V1.0 (yun300.cn) ,07/06/2021
- [50] What is an OLED? | Ossila ,07/06/2021
- [51] Y. Murat, “Nouvelles structures électroluminescentes organiques pour applications signalétiques et petits afficheurs », Thèse, Université de Bordeaux, 2017.
- [52] Taillepierre Philippe, « Diodes Electroluminescentes organiques : Etudes des Efficacités Lumineuses et du Traitement Ionique », Thèse, Université de Limoges, 2006.
- [53] <https://www.ossila.com/products/alq3>, 13/06/2021

- 
- [54] <https://www.ossila.com/products/irppy3>, 13/06/2021
- [55] <https://www.ossila.com/products/cbp>, 13/06/2021
- [56] TAZ | Sublimed, >99.0% Purity | CAS 150405-69-9 | Ossila, 13/06/2021
- [57] <https://www.sigmaaldrich.com/DZ/fr/product/aldrich/760420>, 13/06/2021
- [58] <https://www.gpvdm.com/docs/tutorials/whatisgpvdm.pdf> , le 15/06/2021
- [59] [newsimulation.pdf \(gpvdm.com\)](#),13/06/2021
- [60] [electricalparams.pdf \(gpvdm.com\)](#),13/06/2021
- [61] [ofets\\_and\\_meshing.pdf \(gpvdm.com\)](#), 13/06/2021
- [62] <https://www.gpvdm.com/docs/tutorials/perovskites.pdf>, 13/06/2021
- [63] <https://patents.google.com/patent/WO2001093642A1>, 13/06/2021

---

---

## Résumé

**Titre : Etude et Simulation des propriétés électriques et optiques des cellules organique OLED (Tandem et Bulk)**

**Résumé :**

Les OLED, diodes électroluminescentes organiques, suscitent actuellement beaucoup d'enthousiasme et apportent de nouvelles perspectives dans le domaine de l'éclairage. Aujourd'hui employées à l'échelle industrielle dans des écrans d'appareils mobiles, elles commencent à percer le marché des téléviseurs.

Dans ce mémoire, nous avons brièvement présenté la technologie OLED et ses applications.

Grâce au logiciel GPVDM, nous avons étudié des propriétés électriques et optiques de différentes configurations structurales (Bulk et Tandem) et à différents oxydes métalliques (ZnO, InO<sub>3</sub> et SnO<sub>2</sub>).

**Mots clés : OLEDs, Tandem, Bulk, ZnO, InO<sub>3</sub> et SnO<sub>2</sub>, propriétés électriques et optiques, GPVDM.**

**Title : Study and Simulation of the electrical and optical properties of organic OLED cells (Tandem and Bulk)**

**Abstract :**

OLEDs, organic light emitting diodes, are currently generating a lot of enthusiasm and bringing new perspectives in the field of lighting. Now employed on an industrial scale in mobile device screens, they are beginning to enter the television market. In this work, we have briefly introduced OLED technology and its applications.

Thanks to the GPVDM software, we studied the electrical and optical properties of different structural configuration (Bulk and Tandem) at different metal oxides (ZnO, InO<sub>3</sub> and SnO<sub>2</sub>).

**Keywords : OLEDs, Tandem, Bulk, ZnO, InO<sub>3</sub> and SnO<sub>2</sub>, electrical and optical properties, GPVDM.**

---

العنوان: دراسة ومحاكاة الخواص الكهربائية والبصرية لخلايا OLED العضوية (الترادفية والسائبة)

**ملخص:**

تولد OLEDs، الثنائيات العضوية الباعثة للضوء، حاليًا الكثير من الحماس وتجلب آفاقًا جديدة في مجال الإضاءة. الآن، الذين يعملون على نطاق صناعي في شاشات الأجهزة المحمولة، بدأوا في دخول سوق التلفزيون.

في هذا الموجز، قدمنا بليجاز تقنية OLED وتطبيقاتها.

باستخدام برنامج GPVDM، درسنا الخصائص الكهربائية والبصرية للتكوينات الهيكلية المختلفة (السائبة والترادفية) مع أكاسيد المعادن المختلفة (ZnO و InO<sub>3</sub> و SnO<sub>2</sub>).

الكلمات المفتاحية: " OLED الثنائيات العضوية الباعثة للضوء"، السائبة والترادفية، ZnO و InO<sub>3</sub> و SnO<sub>2</sub>، الخواص الكهربائية والبصرية، GPVDM



## Résumé :

Les OLED, diodes électroluminescentes organiques, suscitent actuellement beaucoup d'enthousiasme et apportent de nouvelles perspectives dans le domaine de l'éclairage. Aujourd'hui employées à l'échelle industrielle dans des écrans d'appareils mobiles, elles commencent à percer le marché des téléviseurs. Quels seront les prochains marchés, et à quelles échéances ? C'est pour répondre à cette question que nous présentons ici un bilan des propriétés des OLED, de leurs performances actuelles et à venir et des verrous technologiques qui restent à lever.

**Mots clés :** « OLEDs : diodes électroluminescentes organiques », Tandem, Bulk, ZnO, InO<sub>3</sub> et SnO<sub>2</sub>, propriétés électriques et optiques, GPVDM.

## 1. Introduction :

Le marché de l'électronique organique est voué à un avenir brillant, ainsi que la technologie des diodes électroluminescentes organiques qui représentent un potentiel important pour la lumière du futur. Les industriels de différents secteurs placent beaucoup d'espoir sur les OLEDs dont les avantages sont attrayants : intégration sur des supports souples, faible consommation d'énergie, bonne qualité d'image, diverses applications possibles...

### Le but de ce travail est :

- De présenter brièvement les cellules OLED et ses structures.
- D'étudier les propriétés optiques et électriques des OLED (Tandem et Bulk) avec différentes couches d'oxydes métalliques pour déterminer son efficacité avec GPVDM.

## 1/Familles OLED :

### □ OLED Tandem :

La diode électroluminescente organique tandem (OLED) est un appareil qui relie deux ou plusieurs unités électroluminescentes avec une ou plusieurs couches de génération de charge (CGL). L'unité électroluminescentes constituées d'une ou plusieurs couches émissives. [1]

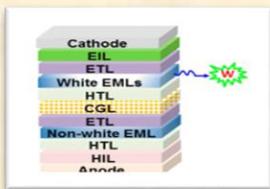


Figure 1 : Structure d'une OLED Tandem. [2]

### □ OLED Bulk :

OLED Bulk est constituée d'une seule couche organique luminescent (couche émissive) d'environ 100 nm d'épaisseur inséré entre deux électrodes de natures chimiques différentes.

OLED Bulk peut être utilisée pour réaliser une émission monochromatique. [3]

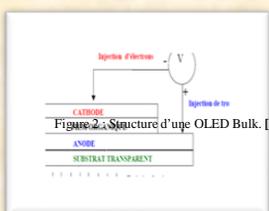


Figure 2 : Structure d'une OLED Bulk. [3]

## 2/Modélisation et simulation des OLEDs :

- Approche mathématique : [4]

La loi de Gauss :

$$\nabla \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \nabla \Phi = q(n-p)$$

Termes de conduction des électrons :

$$J_n = q \mu_e n \nabla E_v + q D_n \nabla n$$

Termes de conduction des trous :

$$J_p = q \mu_h p \nabla E_v + q D_p \nabla p$$

Continuité électronique :

$$\nabla \cdot J_n = q (R_n + T_n + \frac{\partial n_{free}}{\partial t})$$

Continuité du trou :

$$\nabla \cdot J_p = -q (R_p + T_p + \frac{\partial p_{free}}{\partial t})$$

Equation de Schokley-Read-Hal

$$R_T = \frac{np - n_i^2}{\tau_p n_0 [n + n_i \exp(\frac{E_T - E_i}{kT})] + \tau_n n_0 [p + n_i \exp(\frac{E_i - E_T}{kT})]}$$

## 3/Logiciel GPVDM (Général-Propose Photovoltaic Device Model):

GPVDM est un modèle d'appareil optoélectronique 1D / 2D, qui peut être utilisé pour simuler des cellules solaires, des LED, des diodes, des FET, etc.

GPVDM comprend des modèles avancés de traçage de rayons pour vous aider à comprendre et à visualiser le chemin que prend la lumière d'un appareil. [5]

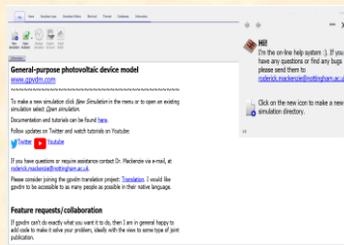


Figure 3 : L'interface GPVDM.

## Références :

- [1] B. S. Kim, H. Chae, H. K. Chung, and S. M. Cho, "Electrical and optical analyses of tandem organic light-emitting diodes with organic charge-generation layer," AIP Adv., vol. 8, no. 6, 2018, doi: 10.1063/1.5026880.
- [2] P. Xiao, J. Huang, Y. Yu, and B. Liu, "Recent developments in tandem white organic light-emitting diodes," Molecules, vol. 24, no. 1, pp. 1–27, 2019, doi: 10.3390/molecules24010151.
- [3] BELABBAS Lamia - BELABBAS Ounissa, "Simulation d'une diode électroluminescente organique sous ATLAS-SILVACO", mémoire de Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2018
- [4] <https://www.gpvd.com/>, 13/06/2021
- [5] <https://www.gpvd.com/docs/tutorials/whatsgpvdm.pdf>, 15/06/2021

## Les dispositifs étudiés :



Figure 4: Structure OLED Bulk par GPVDM

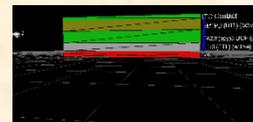


Figure 4: Structure OLED Tandem par GPVDM

## 4/Résultats et discussions :

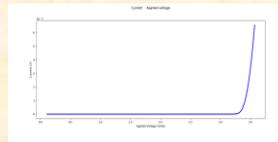


Figure 4 : caractéristiques I-V (OLED Bulk)

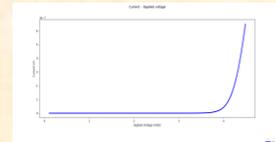


Figure 5 : caractéristiques I-V (OLED Tandem)

Avant la tension de seuil ; le courant est nul quel que soit l'augmentation de la tension appliquée.

A la tension de seuil (de l'ordre 3,3V pour l'OLED Bulk et de l'ordre de 3,8V pour Tandem) ou le courant est augmenté jusqu'à atteindre sa valeur maximale pour une tension de l'ordre de 5V

### Propriétés optiques :

#### Influence de l'anode sur OLED Bulk :

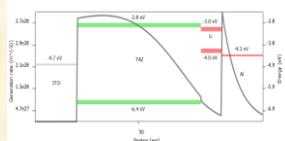


Figure 9 : Le taux de génération de photons dans l'OLED Bulk à base d'anode ITO

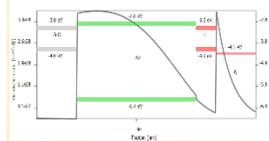


Figure 7 : Le taux de génération de photons dans l'OLED Bulk à base d'anode ZnO

D'après la figure 8 et 9 on constate que : Dans la région de la couche émissive : le taux de génération pour l'OLED Bulk à base de ITO est plus grande par rapport à celle à base de ZnO et cela est dû à l'augmentation de densité de photons et cela nous assure qu'il y a une injection efficace dans l'interface ITO/TAZ : Ir(ppy).

#### Influence de la cathode sur OLED Bulk :

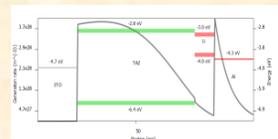


Figure 9 : Le taux de génération de photons dans l'OLED Bulk à base d'anode ITO

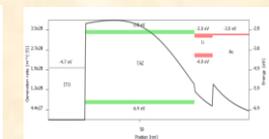


Figure 7 : Le taux de génération de photons dans l'OLED Bulk à base d'anode ZnO

En commençant par l'anode, on remarque que le taux de génération est nul, pour la couche émissive on a un taux de génération maximum résultant du contact entre les travaux de sortie des électrodes et les deux niveaux d'énergie HOMO, LUMO de couche émissive, puis il diminue progressivement en traduisant le phénomène d'électroluminescence, puis il augmente d'une valeur significative (pour la cathode Al) par rapport à la cathode Au jusqu'à indiquer l'émission du photon à travers elle, et ce qui montre que la cathode Al est performant, cela est dû à l'injection efficace d'électrons dans l'interface Al/TAZ : Ir(ppy)3.

## Conclusion et perspective:

Au cours de ce travail nous avons utilisé la simulation afin d'optimiser les paramètres des cellules OLED. Nous avons étudié l'optimisation de la structure d'une cellule OLED à base de matériaux organiques et notamment l'effet de l'addition des couches organiques (HTL, ETL) sur la structure OLED.

D'après les résultats, on a :

- OLED de type Bulk est performant par rapport à celle de Tandem.
- Le changement des électrodes (Anode et cathode) est influent sur la performance d'une OLED, ce travail ouvre la voie à de riches perspectives de recherche dans le domaine d'électroluminescence par l'étude et l'utilisation d'autres TCO avec des différents matériaux organiques.