

Étude de performance et de vieillissement d'un dispositif OLED

par

François-Xavier FORTIER

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 15 MAI 2017

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Sylvain G. Cloutier, directeur de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Jean-François Boland, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. François Blanchard, membre du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

ILA FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 11 AVRIL 2017

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Depuis l'invention de la presse à imprimer par Johannes Gutenberg, le monde a acquis de multiples moyens d'afficher de l'information complexe de façon aisément reproductible et efficace. L'un de ces moyens est assez récent dans l'histoire de l'humanité et a provoqué tout un tumulte, la télévision! Cette technologie a permis l'accès à de l'information uniforme et simultanée partout dans le monde. La qualité de cette information était sans précédent, c'était la capacité de voir une succession d'images similaires à la vue humaine. L'arrivée de l'ordinateur personnel est venue augmenter les fonctionnalités de la télévision. Il était maintenant possible de modifier en temps réel le contenu et le format de l'information. Cela a mené à une ère où l'information est facilement accessible, fiable et modifiable.

Des investissements considérables en recherche et développement ont été faits afin de trouver et concevoir de nouveaux médias d'information. Étonnamment, les œuvres de science-fiction inspirent ou sont inspirées de ce qui pourrait être ces nouveaux médias. Il faut maintenant imaginer une réalité où l'information peut être accessible depuis n'importe quelles surfaces, même si elles sont grandes, courbes ou transparentes. Grâce à une technologie largement étudiée depuis les 20 dernières années, cette perspective relève de moins en moins de la science-fiction que de la réalité. Cette technologie prometteuse est l'« Organic Light Emitting Diode » ou OLED. Ce pendant organique des LEDs peut être fabriqué sur des substrats flexibles et transparents. Chaque pixel étant une source de lumière indépendante, il est possible d'éteindre complètement ou une partie d'un écran. Cela amène des économies d'énergies et l'amélioration du contraste. Des imprimantes sont en développement afin de fabriquer des écrans de tailles variables.

Néanmoins, l'OLED a pour principal défaut d'avoir une durée de vie courte, spécialement ceux émettant la lumière bleue. Ce mémoire aborde ce problème et détaille une façon de mesurer efficacement la durée de vie de cette technologie. Cela en espérant sauver du temps de développement pour les fabricants de cette technologie.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout premièrement à remercier mon directeur de recherche, Sylvain G. Cloutier, pour avoir cru en mes compétences et pour la liberté qu'il m'a accordée lors de la réalisation de mon projet de recherche. De plus, je remercie les membres du jury pour leur intérêt porté à mon sujet de recherche et le temps qu'ils ont investi à l'évaluer.

Par ailleurs, j'en profite pour remercier Vladimir Mitcul, Charles Lequin-Peloquin et Alexandre Rinaldi de Bombardier incorporé pour leurs avis et perspectives sur la problématique de mon projet de recherche.

Un remerciement sincère va Nelson Landry pour son support et son attention lors de la progression de ma recherche. J'en profite aussi pour remercier François Roy-Moisan pour son aide technique et son support émotionnel.

Cette maîtrise aurait été beaucoup plus longue sans la présence des membres du groupe de recherche dirigé par Sylvain Cloutier, le NOMAD. Donc, je remercie amicalement Charles Trudeau, Luis Felipe Gerlein Reyes, Paul Fourmont, Riad Nechache, Jaime Benavides, Debika Banerjee et Xiaohang Guo.

Pour leur indéfectible support moral, je remercie ma famille : Yvon, Yolande et Alexandre pour avoir cru en moi. Je tiens aussi à mentionner un ami de longue date, Marc-André Héту pour ses encouragements et son appui dans les moments difficiles.

Merci à l'École de technologie supérieure pour la qualité de ses services et de son enseignement. Bref, le dernier remerciement va au Consortium de recherche et d'innovation en aérospatiale au Québec (CRIAQ) ainsi qu'aux collaborateurs du projet AVIO-606C sans qui ce projet de recherche n'aurait probablement pas vu le jour.

ÉTUDE DE PERFORMANCE ET DE VIEILLISSEMENT D'UN DISPOSITIF OLED

François-Xavier FORTIER

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente une méthode pour déterminer la durée de vie d'un écran PMOLED par ADT avec photolyse comme facteur accélérant. La lumière utilisée pour la photolyse est produite par une DEL émettant à 405 nm. La particularité de cette méthode est qu'elle utilise une lumière dans le spectre visible. Cette méthode peut être utilisée sans modifier l'écran et avec un minimum de matériel pour construire un banc de test. Les DELs émettant la lumière à 405 nm peuvent être contrôlées par un montage ayant un amplificateur opérationnel asservissant un transistor Darlington. Le montage est placé sous une boîte opaque afin d'éviter une exposition à d'autres sources de lumière. Le tout est ventilé pour que les différentes parties du banc de test reste à température pièce. L'écran sélectionné pour les tests est le UG-9664HDDAG01 et les DELs à 405 nm sont des LZ1-10UA00-00U8. Les DELs ont été ajustées afin de produire différentes irradiances variant entre 140 W/m^2 et 1090 W/m^2 . La dégradation observée montre que les pixels de l'écran se détériorent nettement plus rapidement lors que ceux-ci sont actifs. Ceux éteints lors des tests sont aussi affectés, mais leur dégradation est moins importante. Des mesures de l'irradiance ont été prises à toutes les 24 heures avec un mesureur de puissance ajusté à la longueur d'onde dominante émise par l'écran. D'après la littérature scientifique sur les OLEDs, il est connu que le matériel organique émettant la lumière bleu est celui ayant la durée de vie la plus courte. Une attention particulière a été orientée vers la durée de vie de cet émetteur. Les tests sont considérés comme étant terminés lorsque l'irradiance de l'écran atteint la moitié de l'irradiance initiale. Les données ont été accumulées et présentées dans un graphique log-log. Ces données semblent être linéaires sur le graphique log-log et une relation en a été tirée. De plus, ces données ont été traitées avec les distributions Weibull et lognormale. Si l'écran est placé tel qu'un panneau solaire dans les conditions spécifiées dans la norme ASTM G173-03 à 405 nm, cet écran aurait une durée de vie 21 866 heures selon la relation établie avec le graphique log-log. Selon la distribution Weibull et lognormale, la durée de vie moyenne serait respectivement 23 666 heures et 21 995 heures. Le fabricant de cet écran indique dans la fiche technique que celui-ci a une durée de vie de 10 000 heures. Leur durée de vie a été calculée par cyclage thermique. L'écran devrait être exposé à une irradiance de $2,31 \text{ W/m}^2$ pour que l'écran ait la même durée de vie que celle spécifiée par le fabricant.

Mots-clés : PMOLED, OLED, durée de vie, test par dégradation accélérée, photolyse.

STUDY ON PERFORMANCE AND AGING OF AN OLED DEVICE

François-Xavier FORTIER

ABSTRACT

This thesis presents a method to evaluate the lifetime of a PMOLED display by ADT. It uses photodegradation as accelerant factor. The light was emitted by LEDs with an emission peak at 405 nm, which is in the visible spectrum. The display requires no modification in order to perform the test. The test bench can be built with a minimum of components. The LEDs were controlled with a Darlington transistor driven by an operational-amplifier. To avoid any external light exposure, the test bench was placed in a black box. The whole test bench is ventilated to keep it near room temperature. The selected PMOLED units were UG-9664HDDAG01 and LEDs for photodegradation were LZ1-10UA00-00U8. Those LEDs were powered at an irradiance from 140 W/m² to 1090 W/m². After tests, the active parts of displays were more degraded than those turned off. Also, the degraded pixels became thinner at their center. The measurements were taken at every 24 hours with a calibrated powermeter sets at the main peak wavelength of the PMOLED display. It is known that the blue light emitter has the shortest lifetime. This work focuses on the degradation of the blue emitter. The tests finishes when the displays reach half of the original irradiance. The data were presented in a log-log plot and the relation seems linear for the obtain results. If the tested displays were used under the same conditions as a solar panel, as described in the standard ASTM G173-03 at 405 nm, the displays would last 21,866 hours. The same data was analysed with Weibull and lognormal distributions in order to get average life. According to those distributions, the average life time would respectively be 23 666 hours and 21 995 hours. The manufacturer specified a lifetime of 10 000 hours estimated by thermal cycling. If that lifetime is considered as a reference, the display should be exposed to an irradiance of 2.31 W/m² at 405nm in order to respect that reference.

Keywords : PMOLED, OLED, Lifetime, Accelerated Degratisation testing, photodegradation.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 LA TECHNOLOGIE OLED ET SES PROBLÉMATIQUES	5
1.1 Qu'est-ce qu'une OLED?	5
1.1.1 Structure	5
1.1.2 Types et applications	11
1.2 Problématiques	14
1.2.1 Mitigations	15
1.2.2 Tests de durée vie	15
1.2.3 Alternative proposée	16
CHAPITRE 2 ÉTAT DE LA COMMERCIALISATION ET REVUE DE NORMES	19
2.1 Viabilité et pertinence de la technologie OLED	19
2.2 Intension sur des intégrations futures	19
2.3 Investissements et annonces d'expansions	20
2.4 Étude des normes et exigences industrielles	21
2.4.1 Identification des normes applicables	21
2.4.2 Points pertinents de la révision des normes	23
CHAPITRE 3 REVUE DE LA LITTÉRATURE	25
3.1 Caractéristique de la vie d'une OLED	25
3.2 Les notions de la photochimie	28
3.3 La lumière comme facteur d'accélération de vieillissement	32
3.4 Méthode de tests accélérés	35
CHAPITRE 4 MÉTHODE DE MESURE DE TEMPS DE VIE PROPOSÉE	39
4.1 Évaluation des dispositifs OLED comme échantillons potentiels	39
4.1.1 AMOLED petit format	39
4.1.2 AMOLED grand format	40
4.1.3 PMOLED	40
4.2 Condition de tests	41
4.3 Résultats de l'approche quasi expérimentale	43
4.4 Méthode proposée	50
CHAPITRE 5 MISE EN APPLICATION DE LA MÉTHODE	53
5.1 Préparation du matériel	53
5.1.1 La boîte noire	53
5.1.2 Écran PMOLED	54
5.1.3 Arduino UNO	55
5.1.4 Mesureur de puissance Thorlabs SV120c	56
5.1.5 DELs 405 nm et support	57

5.1.6	Contrôleur de courant pour les DELs 405 nm	58
5.2	Procédure de test	60
CHAPITRE 6 RÉSULTATS DES TESTS DE DÉGRADATION		63
6.1	Observations et présentations des résultats	63
6.1.1	Inspection visuelle	63
6.1.2	Dégradation l'irradiance des écrans lors du test	65
6.2	Analyse sommaire de la durée de vie	67
CHAPITRE 7 APPROCHES STATISTIQUES		69
7.1	Analyse statistique des durées de vie	69
7.1.1	MLE avec la distribution Lognormale	69
7.1.2	La loi des moindres carrés avec la distribution Weibull	72
7.2	Proposition d'une référence à 405 nm pour estimation de la durée de vie normale	76
7.3	Validation des résultats	79
CONCLUSION		81
RECOMMANDATIONS		83
ANNEXE I CODE POUR CONTRÔLER L'ÉCRAN PMOLED AVEC UN ARDUINO UNO		85
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		89

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Résumé des types et applications des OLEDs12
Tableau 3.1	Paramètres obtenus des approximations des courbes de vieillissement des OLEDs selon la figure 3.127
Tableau 5.1	Branchement entre écran et l'Arduino UNO55
Tableau 6.1	Temps défaillance en fonction des irradiances des DELs à 405 nm.....67
Tableau 7.1	Temps de défaillance70
Tableau 7.2	Résultats de la loi des moindres carrés sur les données de la figure 7.275
Tableau 7.3	Résumé des durées de vie78

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Configuration d'une OLED et structures moléculaires8
Figure 1.2	Structure d'une OLED commerciale9
Figure 1.3	Exemple d'un circuit TFT pour une OLED.....13
Figure 3.1	Courbe de vieillissement d'OLEDs en fonction des températures 25°C, 85°C et 120°C26
Figure 3.2	Courbes de vieillissement en fonction de la chaleur en luminance et en temps normalisés26
Figure 3.3	LT50 approximée par SED avec la constante $\beta = 0.53$28
Figure 3.4	Diagramme de Jablonski29
Figure 3.5	Intensité du spectre de la fluorescence d'un film de polypropylène30
Figure 3.6	Dégradation des OLED bleus à différentes intensités d'UV33
Figure 3.7	Résultats des tests de dégradation des OLED exposées aux UV34
Figure 3.8	Comparaison de la dégradation électrique versus UV34
Figure 4.1	Écran Samsung AMS397GE12.....39
Figure 4.2	Écran PMOLED UG-9664HDDAG0141
Figure 4.3	Écran PMOLED avec patron d'échiquier43
Figure 4.4	Écran de téléphone Samsung après test44
Figure 4.5	Le même écran, mais en rouge, vert, et bleu44
Figure 4.6	Vue rapprochée de la zone d'exposition.....44
Figure 4.7	Profil d'atténuation de la partie dégradée45
Figure 4.8	Écran PMOLED non modifié à gauche, film au centre, écran PMOLED sans filtre à gauche.....46
Figure 4.9	Transmittance du filtre sur l'écran PMOLED47

Figure 4.10	Écran PMOLED détérioré.....	47
Figure 4.11	Spectre optique normalisé de l'écran PMOLED	48
Figure 4.12	Spectre optique normalisé des pixels bleus de l'écran PMOLED	49
Figure 4.13	Spectre optique normalisé des pixels verts de l'écran PMOLED.....	49
Figure 4.14	Spectre optique normalisé des pixels rouges de l'écran PMOLED	50
Figure 5.1	Disposition des écrans.....	54
Figure 5.2	Les branchements.....	54
Figure 5.3	Mesureur de puissance Thorlabs.....	57
Figure 5.4	Gabarit pour aligner l'écran au photodétecteur, à gauche le dessous, au centre le dessus, à droite une fois monté	57
Figure 5.5	DELs à 405 nm et support	58
Figure 5.6	Schéma du contrôleur de courant.....	59
Figure 5.7	Montage du contrôleur de courant	60
Figure 6.1	(a) Photographie de l'écran PMOLED avant test, (b) photographie après le test, (c) écran avec fond blanc, la dégradation a affecté les pixels actifs lors du test.....	64
Figure 6.2	Dégradation normalisée en fonction du temps des écrans	65
Figure 6.3	Moyennes des mesures normalisées des tests de dégradations.....	66
Figure 6.4	Graphique log-log du LT50 des écrans en fonction des irradiances des DELs	68
Figure 7.1	Représentation paramétrique lognormale et approximation d'une loi de puissance inverse	71
Figure 7.2	Courbes statistiques à stress constant	74
Figure 7.3	Logarithme du paramètre de forme en fonction du logarithme de l'irradiance	75

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ADT	Accelerated Degradation Test
ALT	Accelerated Life Testing
AMOLED	Active Matrix Organic Light Emitting Diode
CIE	Commission internationale de l'éclairage
CRIAQ	Consortium de recherche et d'innovation en aérospatiale au Québec
DEL	diodes électroluminescente
ÉTS	École de technologie supérieure
IDE	Integrated development environment
IGZO	Indium Gallium Zinc Oxide
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
LT50	Lifetime at 50% of the original luminance
LT70	Lifetime at 70% of the original luminance
TPS	Low-Temperature polycrystalline silicon
MLE	Maximum Likelihood Estimation
OLED	Organic Light Emitting Diode
OTFT	Organic Thin Film Transistor
PCB	Printed Circuit Board
PLED	Polymer LED
PMOLED	Passive Matrix Organic Light Emitting Diode
POLED	Polymer OLED

XX

RGB	Red, Green, Blue
SED	Surface-conduction electron-emitter display
SMOLED	Small Molecules OLED
TFT	Thin Film Transistor
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultraviolet
WOLED	White OLED

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE LONGUEUR ET D'AIRE

m	mètre
µm	micromètre
nm	nanomètre
cm ²	centimètre carré
mm ²	millimètre carré
µm ²	micromètre carré

UNITÉS ÉLECTRIQUES

mA	milliampère
µA	microampère
V	volt
mV	millivolt

SYMBOLE D'ÉLÉMENT CHIMIQUE

Si	Silicium
MgAg	Magnésium et Argent

UNITÉS DE PUISSANCE ÉLECTRIQUE

mW	milliwatt
----	-----------

UNITÉS DE RADIOACTIVITÉ

Rad	« Radiation Absorbed Dose »
-----	-----------------------------

UNITÉS OPTIQUES

mW/cm ²	milliwatt par centimètre carré
mW/cm ²	milliwatt par mètre carré
W/m ²	irradiance, watt par mètre carré
cd/m ²	luminance, candela par mètre carré

UNITÉS TEMPS

h	heure
---	-------

UNITÉS CALORIFIQUES

°C	degré Celsius
----	---------------

INTRODUCTION

La réalité du progrès technologique veut qu'au XXI^e siècle les innovations soient efficaces énergétiquement, sans métaux lourds, non toxiques, sans terres rares et durables. Dans le domaine des sources d'éclairages et de lumière colorées, de grandes améliorations sont apparues au courant des dernières décennies. La technologie « Light Emitting Diode » (LED) en est un bon exemple. Une autre technologie prometteuse est le pendant organique des LEDs, l'Organic Light Emitting Diode (OLED). Elle est actuellement utilisée dans la fabrication, entre autres, d'écran de téléphone portable (Laäaäperi *et al.*, 2007, p. 1183).

Mais le « Liquid Crystal Display » (LCD) est pourtant une technologie viable et mature qui est en accord avec les exigences précédemment mentionnées. Alors, pourquoi il y a autant d'attention sur la technologie OLED? La raison est simple, cette technologie peut efficacement remplacer la technologie LCD et comporte de nombreux avantages. Contrairement au LCD, des écrans transparents et flexibles peuvent être construits à base d'OLED. De plus, ces écrans seraient plus minces et consommeraient, en moyenne, moins d'énergie. De par la géométrie de sa fabrication, les écrans OLED ont de meilleurs angles de vues, un excellent contraste et de meilleurs temps de réponse. De plus, cette technologie peut être directement utilisée comme luminaire afin d'éclairer un endroit donné. Des entreprises comme Samsung et LG ont commencé à produire massivement des écrans et des solutions d'éclairage à base d'OLED (Mertens, 2014, p. 70).

Cette technologie est très prometteuse de par ses applications actuelles et probables. Sachant qu'il existe actuellement des prototypes d'écrans transparents et flexibles ou courbés, ceux-ci pourraient être implémentés sur des surfaces vitrées comme des fenêtres ou des lunettes pour des applications de réalité augmentée. De plus, cela donnerait la possibilité d'avoir des écrans pliables ou enroulés. En considérant ces manipulations, ceux-ci pourraient être plus grands et être transportés dans des espaces réduits comme un sac à dos par exemple. Il y a actuellement des prototypes d'imprimantes spécialement conçues pour imprimer des écrans OLED de dimensions et de formes très variables. Cela permettrait d'intégrer des écrans sur des murs ou

meubles et ainsi avoir des surfaces à apparence dynamique. Ces surfaces intégrant cette technologie auraient aussi la possibilité de devenir un écran d'ordinateur ou de téléviseur.

0.1 Motivations de la recherche

Si cette technologie a autant de potentiel, pourquoi le marché n'est-il pas submergé par des produits OLED? Malgré qu'il y ait déjà des écrans OLED pour les téléphones portables et les tablettes, le principal problème avec cette technologie c'est que le matériau organique qui émet la lumière bleue a une durée de vie courte. Les écrans OLED utilisant des pixels « Red, Green, Blue » (RGB) auront tendance à jaunir puisqu'il y a une perte d'intensité des sous-pixels bleus (Laääperi *et al.*, 2007, p. 1187). Le sous pixel bleu perd de son intensité plus rapidement que le rouge ou le vert puisqu'il se dégrade plus rapidement que les autres. Les variations de la durée de vie seront abordées plus en détail dans les chapitres suivants.

La recherche présentée dans ce mémoire a pour principal objectif de développer une méthode pour quantifier la durée de vie d'un dispositif OLED selon des conditions ambiantes données. Cette méthode permettrait d'écourter significativement les périodes de tests et ainsi accélérer l'élaboration de nouveaux prototypes plus durables.

0.2 Environnement de recherche

Ce projet de recherche a été réalisé en grande partie dans les laboratoires de la chaire de recherche du professeur Sylvain G. Cloutier. Un bref séjour aux bureaux de Bombardier incorporé, tant leur division transport qu'aéronautique. Cela a permis d'évaluer les exigences viabilisées de la technologie OLED pour des moyens de transport. Cela a ajouté une perspective des limites acceptables que l'OLED devrait avoir pour être intégré dans un moyen de transport lourd. Ce séjour en milieu industriel a été possible grâce au fond MITACS dans le cadre d'un projet CRIAQ.

0.3 Contributions scientifiques de ce travail de recherche

0.3.1 Contributions de ce mémoire

Voici une liste des contributions clés de ce mémoire :

- qu'un écran OLED peut être détérioré par photolyse avec un rayonnement dans le spectre visible;
- la proposition d'une méthode de dégradation accélérée pour déterminer la durée de composant OLED selon une référence dans une condition d'utilisation normale;
- la conception ainsi que l'assemblage d'un banc de test à DELs;
- la suggestion d'une référence pour la durée de vie d'un écran PMOLED exposé à une longueur d'onde de 405 nm.

0.3.2 Publication produite lors de ce travail de recherche

Un article a été publié lors du projet de recherche. Cet article portait sur la dégradation de la technologie OLED par l'exposition à la lumière dans le visible. Il a été publié par Scientific Research Publishing (SCIRP).

- Fortier, François-Xavier et Sylvain G. Cloutier. 2016. « Constant-Stress Accelerated Degradation Life Test of an Organic Light-Emitting Diode Display under Violet Light ». *Engineering*, vol. 8, no 2, p. 45-51. <<http://doi.org/10.4236/eng.2016.82005>>.

0.4 Plan du mémoire

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a été documenté en sept chapitres. Le CHAPITRE 1 explique sommairement ce qu'est la technologie OLED et les problématiques qui lui sont reliées. Le CHAPITRE 2 aborde l'état de la commercialisation de la technologie OLED. Il présente aussi une revue des normes applicables à cette technologie. Le CHAPITRE 3 est la revue de la littérature portant sur la durée de vie d'une OLED et les méthodes ayant déjà été employées pour la quantifier. Le CHAPITRE 4 est la méthode expérimentale proposée pour quantifier la durée de vie. Le CHAPITRE 5 porte sur la mise en application cette méthode. Le CHAPITRE 6 présente les résultats des tests de dégradation. Le CHAPITRE 7 montre l'analyse statistique des résultats présentés dans le chapitre précédent.

CHAPITRE 1

LA TECHNOLOGIE OLED ET SES PROBLÉMATIQUES

1.1 Qu'est-ce qu'une OLED?

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. Bref, elle peut émettre de la lumière qui est perceptible ou non par l'œil humain (Taghi Sharbati *et al.*, 2011, p. 553).

La principale différence entre une OLED et une DEL est que les matériaux de l'OLED permettent de fabriquer des écrans et des solutions d'éclairage mince. Contrairement à ceux des DELs, les matériaux des OLED peuvent être translucides et sont déposables en couches minces (Mertens, 2014, p. 4).

1.1.1 Structure

Il existe de multiples variantes de la technologie OLED et cela implique qu'il y a de nombreuses configurations. Néanmoins, la structure peut être simplifiée en quatre parties. Il est important de mentionner que cette description détaillée permet mieux comprendre le fonctionnement d'une OLED (Mertens, 2014, p. 10).

Voici la liste des parties:

- substrat,
- circuiterie,
- couches organiques,
- encapsulation.

1.1.1.1 Le substrat

Cette partie est le support sur laquelle l'OLED est construite. Les matériaux utilisés sont généralement du verre, du plastique ou du métal. Il existe plusieurs variantes de chacun de ces matériaux et certains sont spécifiquement conçus pour la fabrication des OLED. La compagnie Corning inc. a, par exemple, fabriqué plusieurs types de verre comme le "Lotus Glass" ou le "Gorilla Glass" (Corning inc., 2016). Le substrat est sélectionné en fonction des propriétés souhaitées pour le dispositif OLED lors de la conception.

Dans certains cas, la rigidité est recherchée, alors du verre ou du métal est utilisé. Parfois, il faut un substrat capable de dissiper beaucoup de chaleur, alors du métal est sélectionné. Lorsque l'objectif est de fabriquer un écran flexible, le choix du substrat pourrait être du plastique (Mertens, 2014, p. 10). Certains concepts nécessitent un substrat conducteur, d'autres veulent un substrat isolant. En résumé, le matériau utilisé comme substrat dépend des choix de conceptions.

1.1.1.2 La circuiterie

La circuiterie électrique a pour principal but d'assurer le fonctionnement des pixels en permettant ou non le courant de traverser l'OLED. Celle-ci peut aussi inclure des composantes supplémentaires afin de réduire les effets de vieillissement (Stewart, 2011, p. 505).

Le choix de la méthode de fabrication et des matériaux employés varie aussi énormément en fonction des choix de conception. Dans la majorité des cas, la technologie nécessaire pour contrôler l'état du pixel est nommée « Thin Film Transistor » (TFT) et comme son nom l'indique, elle est constituée de transistor en couches minces. En ce moment, il existe cinq types de TFT utilisés dans la fabrication d'un écran OLED (Mertens 2014, 10 à 12).

Voici justement la liste des cinq types de TFT :

- silicium amorphe,
- silicium amorphe avec compensation,
- « Low-Temperature polycrystalline silicon » (LTPS),
- TFT oxydé,
- TFT organique.

Sur le marché, le silicium amorphe est utilisé dans la conception des écrans LCD à grande dimension. C'est un procédé facile à utiliser, car il est à basse température (~120 °C à 180 °C) ce qui n'endommage pas les autres couches (Raupp *et al.*, 2007, p. 446 ; Nathan *et al.*, 2004, p. 120). La couche de silicium amorphe déposée étant mince, elle peut être déposée sur grande superficie (Takatsuka *et al.*, 2004, p. 952). À cause des différences de tensions, le silicium amorphe est rarement utilisé dans la technologie. Il existe aussi une variante faite par IGNIS Innovation qui résout les problèmes de stabilités. IGNIS prétend que la performance de leur technologie est équivalente à celle du silicium polycristallin (IGNIS, 2011).

La technologie LTPS est plus conductrice que le silicium amorphe et peut être faite à partir d'un substrat de verre. Comparativement au LCD, les écrans OLED sont contrôlés en courant ce qui nécessite plus de temps et de ressources à la fabrication. La majorité des écrans OLED de petites dimensions utilisent le LTPS (Kim *et al.*, 2008, p. 291).

Le TFT oxydé offre une méthode similaire au silicium amorphe. Le métal oxydé le plus utilisé en ce moment est le « Indium Gallium Zinc Oxide » IGZO qui peut être fabriqué sur du verre ou du plastique. Ce matériau est transparent dans le visible et offre une meilleure conductibilité que le silicium amorphe (Kim *et al.*, 2008, p. 294).

Il est aussi possible de faire des TFT organiques (OTFTs). Ceux-ci seraient faits à base de polymères ou de "small molecules". Les OTFTs sont transparents, mais ils sont encore au stade de développement. L'une des applications des OTFTs serait de les utiliser dans des imprimantes spécialisées pour la fabrication de « Active Matrix OLED » (AMOLED) (Noda *et al.*, 2011, p. 316).

1.1.1.3 Couches organiques

La première OLED fonctionnelle conçue pour fins commerciales est montrée dans la figure 1.1 . Celle-ci a été faite et publiée en 1987.

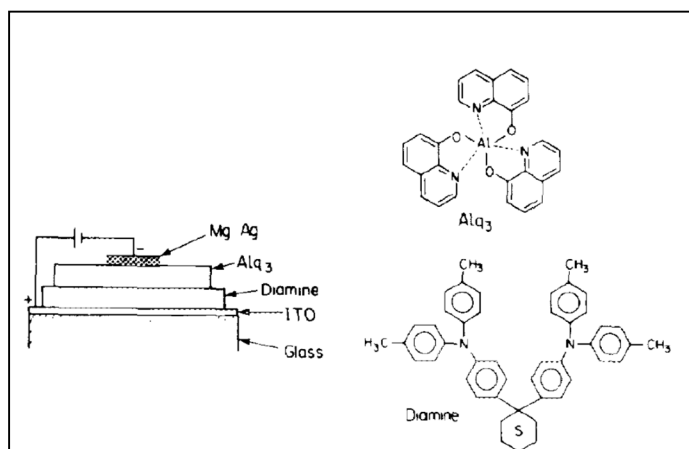


Figure 1.1 Configuration d'une OLED et structures moléculaires
Tirée de Tang et VanSlyke (1987, p. 913)¹

Dans cette figure, les électrodes sont respectivement faites d'un composé de MgAg pour l'anode et d'oxyde d'indium-étain «Indium tin oxide» (ITO) pour la cathode. Les matériaux situés entre les deux électrodes sont d'origine organique. Le composé «8-hydroxyquinoline aluminum» (Alq_3) est la couche luminescente. L'autre est de la diamine. Celle-ci complète la jonction de la diode. La lumière est produite à la frontière entre la diamine et la Alq_3 . La structure est simple et présente bien la composition d'une OLED, mais surtout l'emplacement

¹ Reproduite de (Tang et VanSlyke, 1987) avec la permission de AIP Publishing LLC, <https://doi.org/10.1063/1.98799>

des couches organiques (Tang et VanSlyke, 1987, p. 913). L'explication du fonctionnement de la jonction «p-n» d'une diode est que la partie «p» de la diode est chargée en trous (a un potentiel positif) et que la partie «n» est chargée en électrons (a un potentiel négatif). À la frontière entre la partie «p» et «n», il y a une zone où les charges se recombinent, elle est nommée zone de déplétion. Si les électrons circulent de la partie «n» à «p», il aura émission d'un photon lors de la recombinaison d'un électron et d'un trou à la zone de déplétion. Étant des matériaux organiques, la nomenclature veut la que partie «p» soit la «Hole-Transporting Layer» (HTL) et que la partie «n» soit la «Electron-Transporting Layer» (ETL) (Shinar, 2004, p. 55).

Depuis 1987, beaucoup d'avancées ont été faites au niveau des couches organiques afin de produire d'autres couleurs, allonger leur durée de vie et pour améliorer leur performance. L'une de ces avancées consiste à ajouter des couches afin augmenter l'efficacité et la durabilité des OLEDs commercialisées. Par exemple, des entreprises comme Universal Display et Novaled ont intégré des couches comme le «Blocking Layer» (BL) et le «Hole Injection Layer» (HIL) (Blochwitz-Nimoth *et al.*, 2010, p. 596). Ce BL permet une meilleure distinction entre la couche émettrice «Emissive Layer» (EL) et le ETL. La figure 1.2 montre une vue transversal de la structure proposée pour une OLED commerciale (Universal Display Corporation, 2015).

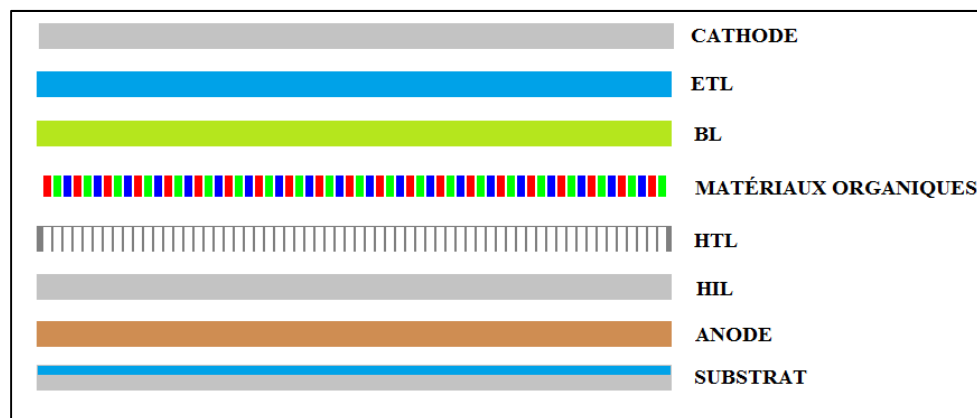


Figure 1.2 Structure d'une OLED commerciale

Les matériaux employés pour les couches organiques sont de natures diverses, certains sont faits à base de polymères, d'autres à base de «small molecules». De plus, ces matériaux peuvent être fluorescents ou phosphorescents. Voici une liste non exhaustive de matériaux utilisés (Shinar 2004, 17,20). Pour simplifier la liste, le nom des familles de molécules ou l'expression réduite sont utilisés.

- Oxadiazoles, matériel pour les premières OLED bleues, durée de vie trop courte,
- «Distyrylarylenes», émetteur de lumière bleue,
- «Rubrene», un colorant à base de «small molecules»,
- «Chelate lanthanide complexes», «small molecules» phosphorescentes,
- les dérivés du PPV, un polymère fluorescent,
- «Poly(p-phenylenes)» (PPPs), un polymère fluorescent,
- «Polythiophenes» (PTs), un polymère fluorescent,
- «Poly(3-alkylthiophenes) » (P3ATs), un polymère fluorescent,
- «Polyfluorenes» (PFOs), un polymère fluorescent,
- «Diphenyl-substituted trans-polyacetylenes» (t-(CH)_x), un polymère fluorescent,
- «Poly(diphenyl acetylene)» (PDPA), un polymère fluorescent.

1.1.1.4 Encapsulation

Les OLEDs sont protégées contre les différentes conditions d'utilisations via un procédé connu sous le nom d'encapsulation. Outre les évidences comme la poussière et les dommages physiques, les OLEDs sont particulièrement sensibles à l'oxydation et à l'humidité (Johnson, 2008, p. 5). Le matériau le plus utilisé comme barrière est le verre. Celui-ci est déjà largement employé dans pour la fabrication des écrans LCD, car il est facile à implémenter.

Il y a aussi une méthode employée par Samsung qui consiste à sceller l'OLED sous une pellicule de polymère grâce au vide (www.etnews.com, 2014). Cela étant dit, il existe plusieurs autres méthodes comme le dépôt de couches minces, du verre flexible développé

par Corning incorporé ou encore la barrière conçue par Universal Display qui est une couche de hybride organique et inorganique (Mertens, 2015, p. 22).

Selon le cas, un scellé est utilisé pour maintenir en place la barrière. C'est généralement une colle de type époxy ou une résine. Certains fabricants ajoutent aussi des déshydratants à l'intérieur de l'OLED afin de réduire la détérioration à long terme par l'humidité ou l'oxygène (Ghosh *et al.*, 2005, p. 1).

1.1.2 Types et applications

Comme mentionné précédemment, les OLEDs peuvent être construites par différents procédés et matériaux. De plus, cette technologie a pour principales applications l'éclairage et être la composante active dans des écrans. Puisque certaines méthodes de fabrications sont intrinsèquement liées entre elles, l'idéal pour résumer la situation est d'utiliser le tableau 1.1 montrant leurs particularités ainsi que leurs applications respectives. Ce tableau présente les acronymes des types d'OLED les plus utilisés. De plus, certains acronymes représentent aussi des méthodes de fabrications.

Par exemple, un AMOLED peut aussi être un FOLED ou un TOLED (Noda *et al.*, 2011, p. 316).

Tableau 1.1 Résumé des types et applications des OLEDs

Acronyme	Nom complet	Particularités	Applications
AMOLED	"Active-Matrix OLED"	Utilisé des TFT	Pour des écrans > 25cm ²
PMOLED	"Passive-Matrix OLED"	Contrôlé ligne par ligne, rafraîchissement élevé nécessaire	Pour des écrans < 25cm ²
SMOLED	"Small-molecules"	fait à base de petites molécules	matériel généralement utilisé dans les écrans commerciales
PHOLED	"Phosphorescent OLED"	Utilise des matériaux phosphorescents dopés avec organométallique complexe	écran, éclairage et rétroéclairage
PLED	"Polymer LED"	fait à base de polymères	Pour impression
WOLED	"White OLED"	Émet seulement de la lumière blanche	éclairage et rétroéclairage
FOLED	"Flexible OLED"	Flexible	Installation sur surface courbe ou faciliter le transport
TOLED	"Transparent OLED"	Transparent	Installation sur surface vitrée, réalité augmentée

La différence entre un écran de type « Passive Matrix OLED » (PMOLED) et AMOLED est que le premier a un contrôle des pixels beaucoup plus simple que le second. Les pixels du PMOLED sont allumés via une matrice de lignes et de colonnes sous les pixels. Lorsqu'un pixel est activé, toute la ligne est alimentée et la colonne sert de sélecteur (Mertens, 2014, p. 16 à 17). Cela a pour problématique de soumettre la ligne à un courant proportionnel au nombre de pixels. Or les OLEDs ont des limitations physiques vis-à-vis le courant. Si celui-ci est trop élevé, le pixel peut vieillir prématurément ou la jonction peut être littéralement détruite (JianPing Zhang *et al.*, 2012, p. 714 à 715). De plus, il faut que le temps de rafraîchissement de l'écran soit suffisamment court pour ne pas être perceptible par l'utilisateur. Puisque un écran PMOLED est contrôlé ligne par ligne, le taux de

rafraîchissement est aussi proportionnel au nombre de lignes, s'il y a en trop, l'actualisation des images sera visible.

Comme mentionné précédemment, l'AMOLED utilise une circuiterie électronique basée sur la technologie TFT. La figure 1.3 montre l'une des plus simples configurations de ce circuit TFT alimentant l'OLED. La configuration des transistors peut varier en fonction de la conception, mais le principe reste le même, chaque sous-pixel est contrôlé individuellement via les transistors et le condensateur maintient l'état précédent.

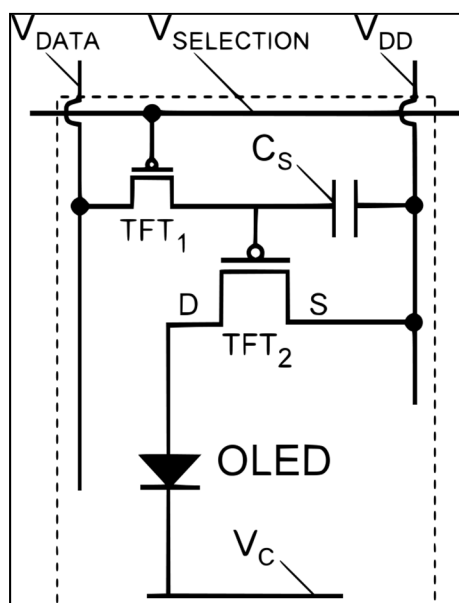


Figure 1.3 Exemple d'un circuit TFT pour une OLED
Tirée d'Armael (2010)

Le « White OLED » (WOLED) est conçu afin qu'il y ait un mélange de couleurs pour produire de la lumière blanche à la sortie du composant. Ce type est surtout utilisé comme source d'éclairage puisqu'il peut être fabriqué en panneaux de grandes dimensions, mais en restant mince. Ils sont aussi utilisés comme rétro éclairage dans des écrans fabriqués par LG Display. La différence entre le « Small Molecules OLED » (SMOLED) et le « Polymer OLED » (POLED) ou « Polymer LED » (PLED) est la taille de la molécule organique qui émet de la lumière. Cela peut se résumer par une SMOLED étant un agglomérat de

molécules versus le POLED étant des molécules attachées ensembles en chaîne, d'où la terminologie de polymère (Mertens, 2014, p. 15).

Pour ce qui est de la « Phosphorescent OLED » (PHOLED), les OLEDs peuvent être phosphorescentes ou fluorescentes d'où l'acronyme PHOLED. Les premières OLEDs étaient fluorescentes (Tang et VanSlyke, 1987). Les émetteurs phosphorescents ont montré être plus durables que les émetteurs fluorescents, mais dans certains cas les émetteurs fluorescents sont encore utilisés. Il y a aussi des OLEDs construites avec les deux types d'émetteurs, phosphorescents et fluorescents (Levermore *et al.*, 2011, p. 944).

1.2 Problématiques

En considérant les applications possibles de cette technologie ainsi que son potentiel d'amélioration via l'introduction de nouveaux nanomatériaux, des efforts considérables ont été investis afin de produire des écrans et des solutions d'éclairages toujours plus grands et plus performants. Jusqu'à maintenant, la principale limitation est la durée de vie du sous-pixel bleu (Laaperi *et al.*, 2007, p. 1183). Sa durée de vie est plus courte que celle du rouge et du vert, en plus d'être inférieure à celle des écrans LCD qui est la technologie la plus utilisée pour les écrans. Malgré cela, les durées de vie estimées par de nombreuses études sont de plusieurs dizaines, même de centaines de milliers d'heures (Mertens, 2014, p. 21 ; Laaperi, 2008, p. 1126 ; Zhang *et al.*, 2012, p. 102).

Puisque cette technologie évolue rapidement, soit par des changements dans les procédures de fabrications ou par l'implémentation de nouveaux matériaux organiques et inorganiques comme le graphène, points quantiques ou encore avec les pérovskites, il devient important d'avoir la possibilité de déterminer en peu de temps la durabilité des nouveaux prototypes (Han *et al.*, 2012).

Sachant que la durée de vie est le goulot d'étranglement à une production massive de cette technologie, la pertinence d'avoir des tests représentatifs, courts dans le temps et peu exigeants en matériel devient alors évidente.

1.2.1 Mitigations

Des solutions alternatives ont été développées afin de mitiger ce problème de durée de vie courte. La plus répandue est d'utiliser la technologie LCD, mais en incluant un rétroéclairage blanc OLED. En effet, les écrans LCD commerciaux fabriqués au cours des dernières années sont rétroéclairés avec des DELs blanches. Or, le WOLED peut très bien remplacer ces DELs blanches. Cela permet de fabriquer des écrans plus minces (Mertens, 2014, p. 17 à 18).

Sachant que le sous-pixel bleu est le problème, certains chercheurs ont décidé d'augmenter la superficie de leurs sous-pixels ou d'en multiplier le nombre versus ceux des autres couleurs (Fukagawa, Watanabe et Tsuzuki, 2008, p. 93). Cela permet de moins les solliciter et ainsi d'allonger artificiellement leur durée de vie.

1.2.2 Tests de durée vie

Le « Accelerated Life Testing » (ALT) est une des méthodes de test utilisées pour quantifier la durée de vie d'un prototype dans une période de temps plus courte que la durée de vie normale en utilisant un facteur accélérant le vieillissement (Yang, 2007, p. 237). Si un ALT est court dans le temps et qu'il nécessite peu de ressources, il devient alors possible d'augmenter les itérations lors du développement de prototypes OLED.

Les méthodes actuellement employées pour les ALTs sont d'accroître le courant circulant dans l'OLED. Le courant étant au-dessus du nominal, l'OLED éclaire plus, mais est aussi plus sollicitée ce qui va accélérer son vieillissement (Park et Bae, 2010, p. 81 à 87). Cela requiert néanmoins de prévoir les modifications supplémentaires afin d'augmenter le courant. Si ces ajustements sont implémentés depuis la conception originale, le coût de production à grande échelle va ainsi augmenter. Dans le cas où les écrans sont échantillonnés depuis la

ligne de production, ceux-ci doivent être quand même modifiés, et ce de façon identique afin d'éviter un biais dans l'analyse des résultats. Cela implique d'allouer des ressources et des personnes ayant les qualifications pour faire ces modifications. Autrement, le dispositif OLED doit être conçu de façon modulable et donc séparable de son alimentation électrique. Il ne resterait qu'à prendre les échantillons et à les mettre sur le banc de tests. Par contre, le fait que l'écran soit physiquement distinct de son alimentation électrique implique qu'il y ait un connecteur afin de le brancher. Cela peut paraître anodin, mais sur des grands volumes de production, ce sont des coûts supplémentaires.

L'autre façon généralement utilisée pour les ALTs des OLEDs est de les cycler thermiquement (Pang *et al.*, 2014, p. 2 à 12). Cela peut être fait par l'utilisation d'une ou plusieurs chambres environnementales. Il est important de mentionner que ces chambres requièrent des infrastructures dédiées et qu'elles sont massives en plus d'être dispendieuses. Il faut aussi qu'elles aient un plan de maintenance puisqu'elles contiennent un compresseur pour le refroidissement de l'environnement de test (ASAP, 2016).

Hypothétiquement, le test de durée de vie idéale devrait permettre de prendre le dispositif OLED directement dans la chaîne de fabrication sans être préalablement modifié et qu'il ne nécessite aucune ressource majeure afin d'être mise en œuvre. De plus, cette caractérisation doit être courte dans le temps.

1.2.3 Alternative proposée

Comme son nom l'indique, une OLED est organique et par le fait même potentiellement sujet au même facteur de détériorations que tout autre objet de nature organique. Les OLEDs sont reconnues pour être très sensibles à l'humidité ainsi qu'à l'oxydation (Johnson, 2008, p. 5). Cela étant, des considérations ont été prises lors de la fabrication des produits commerciaux actuels afin d'isoler les éléments organiques de ces facteurs néfastes. Ces mêmes considérations préviennent aussi les effets destructeurs de substances corrosives qui sont connues pour attaquer les matériaux organiques.

Il y a cependant un facteur de détérioration des matériaux organiques souvent oublié puisqu'il est intangible et même dans certains cas invisible. Ce facteur est la lumière et le rayonnement ultraviolet qui est particulièrement reconnu pour dénaturer certains composés organiques (RABEK, 2012, p. 2). Cette approche sera mise de l'avant dans ce mémoire afin de quantifier la durée de vie d'un dispositif OLED donné. Il est important de mentionner que celui-ci ne sera pas limité qu'au rayonnement ultraviolet, mais bien à plusieurs autres longueurs d'onde. En effet, la lumière dans le visible comme accélérateur du vieillissement sera aussi étudiée et utilisée.

CHAPITRE 2

ÉTAT DE LA COMMERCIALISATION ET REVUE DE NORMES

2.1 Viabilité et pertinence de la technologie OLED

L'une des premières tâches de ce projet de recherche a été d'évaluer la pertinence de la technologie OLED. Selon toute considération, il y a une possibilité que cette technologie soit rejetée par les industries ou les consommateurs. Cela est déjà arrivé par le passé, il est possible de donner l'exemple du « Surface-conduction electron-emitter display » (SED) (Kubo et Takenaka, 2010).

L'utilisation la plus répandue de la technologie OLED en 2015 était celle d'écrans de téléphones intelligents. En effet, la compagnie Samsung a intégré des écrans AMOLED dans ses téléphones de marque Galaxy ainsi que certaines tablettes (Mertens, 2014, p. 31 à 32). Il y a aussi des écrans PMOLED disponibles pour effectuer des tests ainsi que du développement rapide. Il est possible de citer la compagnie NKK qui les a intégré dans leurs interrupteurs à affichage (AlliedElectronics, 2012), mais il y aussi le revendeur NewHeaven display qui en vend de plusieurs dimensions (NewHaven Display, 2016). De plus, Samsung et LG displays ont commercialisé en petite quantité des écrans de 55 pouces de diagonale (Digital Trends, 2013) (LG UK, 2012).

Il est aussi possible de se procurer des montres, cameras et autres gadgets qui incluent des écrans OLED dans leurs conceptions (Mertens, 2014, p. 43).

2.2 Intension sur des intégrations futures

Il est déjà prévu d'utiliser cette technologie en version imprimable afin d'obtenir des écrans de dimensions ajustables selon l'emplacement à recouvrir. Certains secteurs industriels ont déjà été proposés concepts d'intégrations. Par exemple, l'une des intégrations les plus attendues est celle de la réalité augmentée (Wouk, 2015). Mettre un affichage OLED sur des

surfaces vitrées afin d'obtenir des informations, en temps réel, de l'environnement proche de l'utilisateur. Ces surfaces vitrées pourraient être des lunettes, pare-brise, fenêtres, portes ainsi que des meubles (Mertens, 2014).

Une application qui a été observée serait d'utiliser des écrans OLED afin de remplacer des fenêtres. Au lieu de regarder dehors, un écran affiche l'extérieur. Cela permet d'enlever beaucoup d'éléments structurels et par le fait même, du poids. L'écran lui-même étant mince et léger, cette alternative représente une opportunité de diminuer les coûts de production (Atherton, 2014).

2.3 Investissements et annonces d'expansions.

Seulement au courant de l'année 2015, il a été rapporté publiquement que LG annonce la construction d'une usine de fabrication d'OLED évalué à 8,7 milliards USD à Paju (Mertens, 2015). Il y aussi la compagnie Merck qui a commencé la construction d'une usine à Darmstadt en Allemagne qui fabriquerait les composants organiques des OLED, cette usine aurait une valeur de 30 millions d'Euros (Mertens, 2015). Ici au Canada, la compagnie IGNIS Innovation a réussi à accumuler 14 millions pour accélérer le développement de produits OLED (IGNIS, 2015).

Pour ce qui est de l'éclairage, la compagnie OLEDWorks va investir 73.6 millions USD afin d'accroître sa capacité de production (OSA direct, 2015). L'un des grands fabricants de panneaux LCD, BOE Display commence la construction d'une usine de 3.54 milliards USD pour des écrans LCD et AMOLED (Zone, 2015).

Il est important de mentionner qu'il y a beaucoup d'autres annonces qui ont été faites en 2015 concernant l'industrie OLED et ce, à tous les niveaux de la chaîne de production. Les exemples précédemment cités indiquent qu'il y a bel et bien une volonté financière significative de développer industriellement cette technologie.

2.4 Étude des normes et exigences industrielles

Afin de concevoir une méthode vieillissement accélérée de façon efficiente, il est important de réviser ce que les clients potentiels ont comme exigences d'intégration. De plus, il faut considérer les différentes normes pouvant servir de lignes directrices. Deux rapports très intéressants ont été lus afin d'approfondir les exigences industrielles, mais aussi les tests réalisés sur les OLED. Le premier a été rédigé par Boeing sur les exigences qu'un écran devrait avoir pour être installé dans leurs avions (DPAT, 2005). Le second est un rapport de la NASA « JSC-66638 » portant sur des tests environnementaux effectués pour évaluer l'intégration d'AMOLED dans un véhicule spatial (Salazar, 2013, p. 3).

Le premier rapport recoupe de beaucoup d'informations provenant des normes qui seront abordées dans la section suivante de ce mémoire. Celui de la NASA est pertinent puisqu'il s'agit de résultats de tests environnementaux. Leur conclusion indique qu'un AMOLED tolère bien les interférences électromagnétiques ainsi que la radioactivité jusqu'à 600 rads. De plus, le rapport mentionne aussi que les écrans AMOLED utilisés pour leurs tests étaient sensibles aux variations de température (Salazar, 2013, p. 26).

2.4.1 Identification des normes applicables

Il existe une multitude de normes dans ce monde, il est donc important de cerner celles qui vont permettre d'orienter la conception de la méthode ALT visée par ce travail. Afin de le faire de façon efficiente, il est pertinent d'évaluer les conditions dans lesquelles évoluera un dispositif OLED quelconque. Cela permettra aussi d'évaluer les environnements dans lesquels ils pourront évoluer et ainsi identifier les cas où cette technologie n'est pas prête ou qu'elle ne peut pas atteindre certaines exigences.

Un temps considérable de ce travail a consisté à cibler, identifier, trouver et lire les normes des organismes suivants:

- SAE International,
 - ARP4102/7 Electronic Displays,

- ARP4256 Design Objectives for Liquid Crystal Display for Part 25(Transport) Aircraft,
- ARP4260 Photometric and Colorimetric Measurement Procedures for Airborne Flat Panel Displays,
- AS8034B Minimum Performance Standard for Airborne Multipurpose Electronic Displays.
- Les publications du Federal Aviation Administration, États-Unis (FAA),
 - 14 CFR 25 Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes,
 - Advisory Circular 25-11A Electronic Flight Deck Displays,
- Radio Technical Commission for Aeronautics Inc (RTCA),
 - RTCA DO-160/EUROCAE ED-14G Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment,
- U.S. Government Publications,
 - MIL-STD-810G Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests,
 - MIL-STD-1472G Design Criteria Standard Human Engineering,
- International Electrotechnical Commission (IEC),
 - IEC 60068-2-1 Tests-Test A: Cold,
 - IEC 60068-2-2 Tests- Test B: Dry heat,
 - IEC 60068-2-11 Basic Environmental Testing Procedures Part 2: Tests, Test Ka: Salt mist,
 - IEC 60068-2-30 Environmental testing – Part 2-30 Tests – Test Dd: Damp heat, cyclic (12 h+ 12h cycle),
 - IEC 60068-2-75 Part 2: Tests –Test Eh: Hammer Tests,
 - IEC 60571 Electronic Equipment Used on Rail Vehicles,
 - IEC 62341-1-1 Generic specifications,
 - IEC 62341-1-2 OLED Terminology,
 - IEC 62341-5 Environmental testing methods,
 - IEC 62341-5-2 Mechanical endurance testing methods,

- IEC 62341-5-3 OLED display - Measuring methods of image sticking and lifetime,
- IEC 62341-6-1 Measuring methods of optical and electro-optical parameters,
- IEC62341-6-2 OLED Measuring methods of visual quality and ambient performance,
- IEC 62341-6-3 Measuring methods of image quality,
- IEC 62236-3-2 Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 3-2: Rolling stock – Apparatus,
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE),
 - IEEE 16 Standard for Electrical and Electronic Control Apparatus on Rail Vehicles,
 - IEEE 1474.2 Standard for User Interface Requirements in Communications-Based Train Control (CBTC) Systems,
 - IEEE 1476-2000 Standard Train Auxiliary Power Systems Interfaces,
 - IEEE 1477-1998 Standard for Passenger Information System for Rail Transit Vehicles,
 - IEEE 1478 Standard for Environmental Conditions for Transit Rail Car Electronic Equipement,
- International Organization for Standardization (ISO),
 - ISO 9241-305 Ergonomics of Human-System Interaction – Optical Laboratory Test Methods for Electronic Visual Displays,
- Commission International de l'Éclairage (CIE),
 - CIE 85-1989 : Recommendations for the integrated irradiance and the spectral distribution of simulated solar radiation for testing purposes.

2.4.2 Points pertinents de la révision des normes

Après avoir lu et étudié ces différentes normes, les points saillants ont été identifiés. La première et plus significative est la norme ISO 9241-305 qui mentionne des conditions de tests qui conviennent à l'objectif de ce travail. De plus, la série ISO 9241 donne aussi une

terminologie pour l'ensemble des tests, méthodes, mesures ainsi que des dispositifs utilisés dans ce travail (TC 159, 2008).

Ensuite, les exigences dictées dans la plupart des normes qui portaient sur les propriétés optiques d'un écran semblent pouvoir être atteintes par les écrans OLED actuels. Cela est particulièrement vrai pour la luminance, la résolution, le contraste et l'angle de vue.

CHAPITRE 3

REVUE DE LA LITTÉRATURE

3.1 Caractéristique de la vie d'une OLED

La durée de vie des OLEDs étant un des principaux freins à son expansion commerciale, celle-ci a été amplement étudiée par le passé (Laaperi, 2008). Puisque c'est la luminance qui la principale caractéristique observée pour une OLED, la relation présentée dans les publications est la diminution de la luminance en fonction du temps. Il est généralement admis dans l'industrie que la durée de vie d'une OLED est atteinte lorsque sa luminance est à 50% de sa valeur initiale, d'où notation LT50. Dans certains cas, c'est à 70% ou LT70 de la valeur initiale que la durée de vie est exigée (TalkOLED, 2014). Néanmoins la question demeure, est-il possible de prédire la durée de vie d'une OLED?

Une courbe de vieillissement d'une OLED peut être approximée par une exponentielle élargie ou une « stretched exponential » (Ishii et Taga, 2002, p. 3431). Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$L(t) = L_0 e^{-(t/\tau)^\beta} \quad (3.1)$$

Où $L(t)$ est la luminance en fonction du temps t , L_0 est la luminance initiale, τ est la durée de vie de l'OLED et β est le paramètre affectant la forme de la courbe. La chaleur peut être utilisée comme facteur accélérant le vieillissement (Ishii et Taga, 2002, p. 3432). L'équation précédente est supportée par les figures 3.1 et 3.2 .

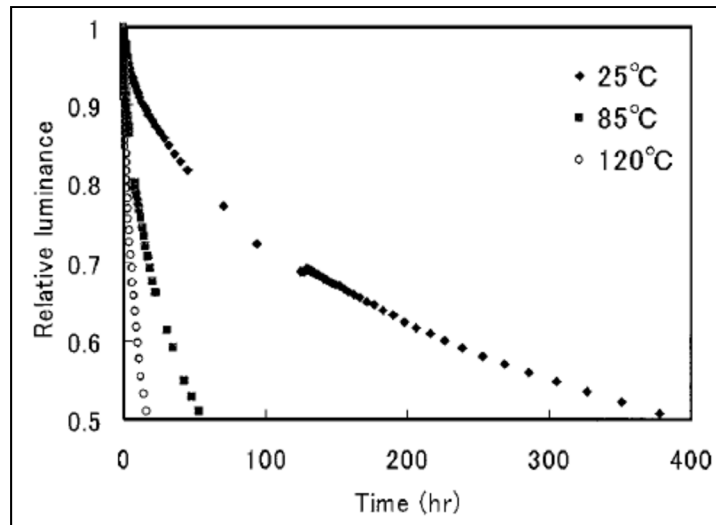


Figure 3.1 Courbe de vieillissement d'OLEDs en fonction des températures 25°C, 85°C et 120°C
Tirée de Masahiko Ishii (2002, p. 3431)²

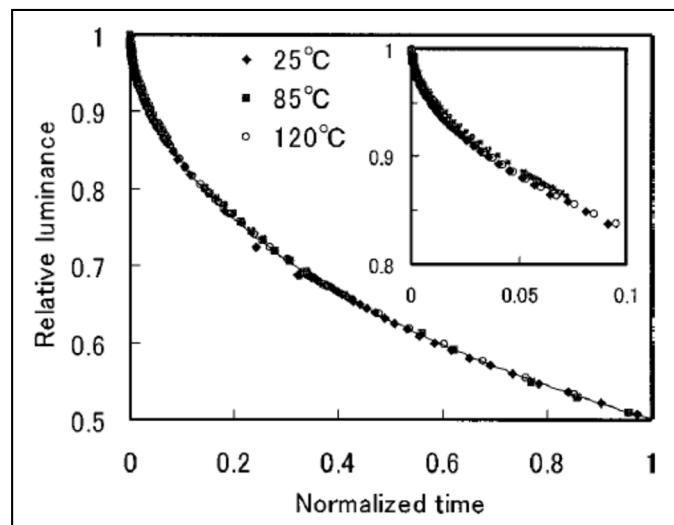


Figure 3.2 Courbes de vieillissement en fonction de la chaleur en luminance et en temps normalisés
Tirée de Masahiko Ishii (2002, p. 3431)³

Il est mentionné dans cet article que le paramètre β varie très peu selon la figure précédente. En effet, la figure 3.2 présente les résultats normalisés en temps et ceux-ci sont uniformément

² Reproduite de (Ishii et Taga, 2002) avec la permission de AIP Publishing LLC, <https://doi.org/10.1063/1.1476704>

³ Reproduite de (Ishii et Taga, 2002) avec la permission de AIP Publishing LLC, <https://doi.org/10.1063/1.1476704>

superposés, cela veut dire que la forme de la courbe ne varie pas en fonction de la température. La température a un impact sur l'amplitude de la courbe du vieillissement accéléré. Cela est remarquable sur la figure 3.1, plus la température est élevée, plus l'OLED testée atteint le « Lifetime 50% » (LT50) dans un laps de temps court. Le tableau 3.1 montre les résultats obtenus par Masahiko Ishii.

Tableau 3.1 Paramètres obtenus des approximations des courbes de vieillissement des OLEDs selon la figure 3.1
Tiré de Masahiko Ishii (2002, p. 3431)⁴

	τ	β
25 °C	1.95 ± 0.01	0.559 ± 0.002
85 °C	1.85 ± 0.02	0.590 ± 0.002
120 °C	1.92 ± 0.02	0.571 ± 0.003

Selon l'article de Féry publié en 2005 (Féry *et al.*, 2005), ils obtiennent un β égale à 0,53 pour leurs OLEDs vertes phosphorescentes multicouche. Au lieu d'utiliser la chaleur comme facteur d'accélération, ils ont varié la luminance initiale des OLEDs au début du test. Celles-ci étaient à 100 cd/m², 200 cd/m², 400 cd/m² et 800 cd/m² pour être exacte. Puisque β est constant dans leur expérience, ils en viennent à l'équation suivante.

$$L_0^n t_{1/2} = \text{constante} \quad (3.2)$$

Où L_0 est la luminance initiale, n est le facteur d'accélération de vieillissement et $t_{1/2}$ est LT50. La valeur de la constante n'est pas spécifiée. Cet auteur met à l'épreuve l'équation précédente en montrant dans un graphique log-log les LT50 des OLEDs testées en fonction de leur luminance initiale. La figure 3.3 illustre ce graphique.

⁴ Reproduite de (Ishii et Taga, 2002) avec la permission de AIP Publishing LLC, <https://doi.org/10.1063/1.1476704>

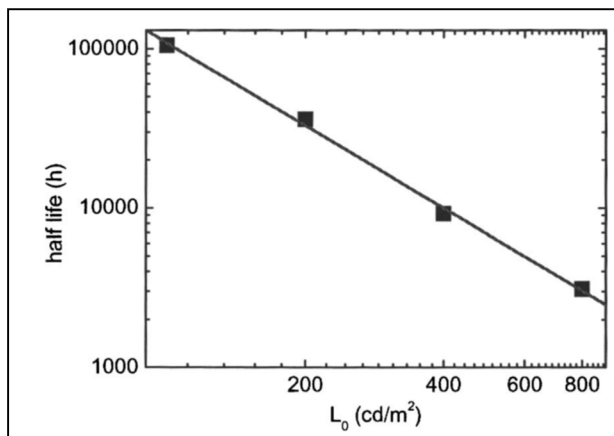


Figure 3.3 LT50 approximée par SED avec la constante $\beta = 0.53$
Tirée de Féry et al (2005, p. 2)⁵

La figure précédente montre l'approximation faite avec l'équation en (3.2). Il obtient une valeur de n égale à 1,7. Le premier point du graphique est estimé à plus de 100 000 heures. L'auteur précise qu'ils ont effectué des tests avec des architectures et matériaux différents. Les résultats de ces tests ont montré que β et n variaient en fonction de ces différences.

3.2 Les notions de la photochimie

La photochimie est l'étude des réactions chimiques provoquées par la lumière. Elle décrit les effets que l'absorption de la lumière depuis la limite de l'ultraviolet (100 nm) jusqu'à l'infrarouge éloigné (2500 nm) (Gold et Chemistry, 1987). À titre indicatif, la lumière visible par l'œil humain est de 390 à 700 nm (Starr, Evers et Starr, 2006). Un des exemples les plus connus de la photochimie est la photosynthèse. Le meilleur moyen pour expliquer les échanges d'énergies est de les représenter graphiquement avec la figure 3.4.

⁵ Reproduite de (Féry *et al.*, 2005) avec la permission de AIP Publishing LLC, <https://doi.org/10.1063/1.1476704>

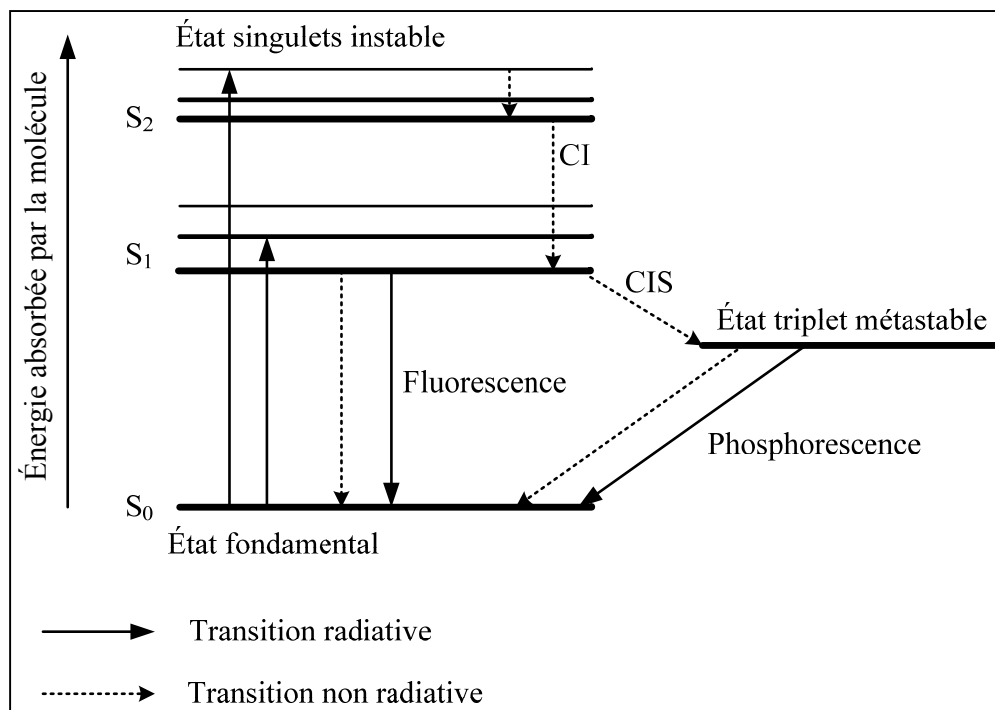


Figure 3.4 Diagramme de Jablonski

La lumière augmente le niveau d'énergie d'une molécule donnée lorsque celle-ci rentre en contact. Les électrons de la molécule ainsi exposée passent de l'état fondamental (S_0) à un des états instables (S_1 , S_2). L'apport d'énergie est donné par la relation Planck-Einstein (French et Taylor, 1979). L'acronyme de la figure précédente CI signifie conversion interne et CIS conversion intersystème. Selon le spin des électrons impliqués, différents états peuvent être atteints: l'état singulet instable ou l'état triplet métastable. Puisque la molécule veut retourner à l'état fondamental, l'énergie peut être transmise par une transition radiative. Alors, un nouveau photon est relâché et si les électrons étaient dans un état instable, le phénomène d'émission est nommé fluorescence (Nancy, 2013). Dans le cas où l'état était métastable, l'émission produite est de la phosphorescence (Nancy, 2013). Cela est intéressant dans la mesure où les OLEDs pourraient visuellement montrer qu'elles sont excitées par une exposition à la lumière. Il est aussi important de mentionner que la molécule impliquée peut retourner à l'état fondamental sans émettre de lumière, d'où la transition non radiative.

Cela étant dit, il faut aborder la question de base : comment une exposition à la lumière peut-elle affecter la composition chimique d'une substance organique ou d'un polymère? Le sujet est en partie expliqué par Jan F. Rabek dans son livre « Polymer Photodegradation: Mechanisms and experimental methods » (RABEK, 2012). D'après ce livre, ce n'est pas une question facile à répondre. Pour être plus explicite, cela varie en fonction du polymère impliqué. Il spécifie le cas du polypropylène qui perdrait son énone lorsqu'exposé à un rayonnement ultraviolet (UV). Une énone est un composé organique constitué d'une fonction cétone et d'une double liaison carbone à carbone. La figure 3.5 montre la fluorescence d'une pellicule de polypropylène exposée aux UV.

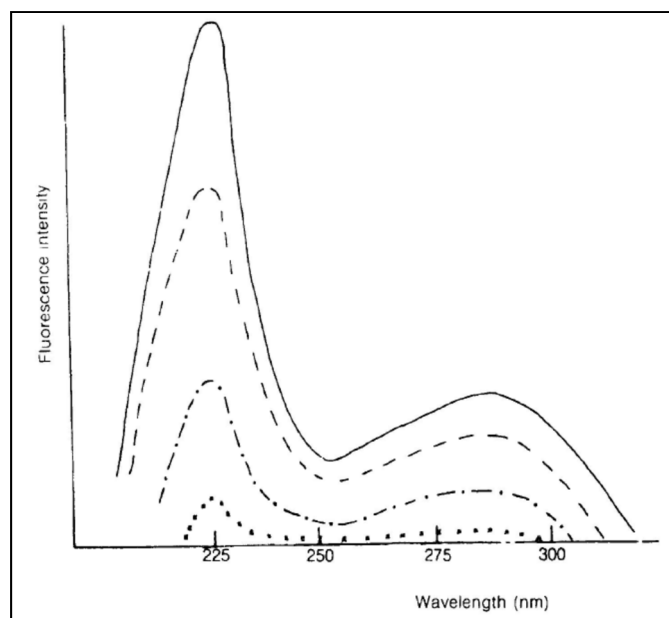


Figure 3.5 Intensité du spectre de la fluorescence d'un film de polypropylène
Tirée de Allen, Homer et McKellar, (1977, p2263)⁶

La ligne continue indique la fluorescence avant l'exposition, l'atténuation continue de façon successive après 75 h (---), 150 h (-.-) et 250 h (xxx). D'après l'auteur, il y aurait deux explications. La première serait qu'il y a formation de groupe carbonyle β , γ -désaturé et que ceux-ci seraient photolysés par une réaction de type Norrish type I ou II. La deuxième serait

⁶Reproduite de (Allen, Homer et McKellar, 1977) avec la permission de John Wiley and Sons,
<https://doi.org/10.1002/app.1977.070210823>

qu'il y est réticulation entre des groupes carbonyles α , β -désaturé. Lorsqu'exposés, les groupes carbonyles α , β -désaturé se transformeraient en cétone saturée et/ou en groupe aldéhyde (RABEK, 2012).

Il est nécessaire d'ajouter que l'exposition à la lumière va altérer ou modifier les molécules organiques ainsi exposées. Les réactions chimiques peuvent être résumées par les quelques exemples suivants (Prasad, 2004, p. 163 à 167):

- photoaddition,
- photofragmentation,
- photo-oxydation,
- photohydration,
- photoisomérisation,
- photoréarrangement.

Simplement, la photoaddition va joindre deux molécules organiques ensembles tandis que la photofragmentation va séparer ladite molécule organique exposée en deux. La photooxydation ainsi que la photohydration sont respectivement l'ajout d'une molécule de dioxygène et d'une molécule d'eau à la molécule organique exposée. De plus, la photoisomérisation va changer la configuration de la molécule organique excitée. L'exemple cité dans la référence mentionne que la molécule peut passer du rétinol 11-*cis* à rétinol tout-*trans* lorsqu'exposé à la lumière. La dernière réaction listée est le photoréarrangement et celle-ci consiste à un réarrangement des liens dans la chaîne de carbone (Prasad, 2004, p. 163 à 167).

Après avoir consultés quelques fiches techniques d'écrans OLED, celles-ci omettent complètement la composition des composants organiques à l'intérieur des dispositifs. Il est fort probable que ces informations relèvent du secret industriel. À moins de fabriquer les OLED nécessaires pour ce projet de recherche, il sera très difficile de déterminer les composants organiques dans les dispositifs OLED qui serviront aux tests.

3.3 La lumière comme facteur d'accélération de vieillissement

En 2010, Ruben Seifert et al. ont publié un article utilisant la lumière ultra-violet pour dégrader des OLED (Seifert *et al.*, 2010). Ledit article a pour sujet l'existence d'une similitude entre la dégradation par courant électrique et celle par ultra-violet. En effet, il est mentionné précédemment dans ce travail qu'un courant électrique supérieur à la valeur nominale pouvait être utilisé comme facteur de vieillissement.

Dans cet article, le détail de la construction de l'échantillon OLED testé est spécifié. Les auteurs ont sélectionné un émetteur bleu fluorescent dont leur article indique qu'il a une durée de vie beaucoup plus courte que le rouge ou le vert. Ils spécifient que la longueur d'onde dominante utilisée est de 367 nm à une irradiance maximale de 142 mW/cm². De plus, l'équation (3.2) est citée par les auteurs de cet article pour la relation entre la demi-vie et la luminance originale. Elle a été modifiée algébriquement pour mettre l'emphase sur la demi-vie. Afin de rendre cette revue de littérature claire et explicite, il est plus simple de représenter cette équation sous sa nouvelle forme (3.3) :

$$t_{0.5} = \frac{C_1}{(L_0)^n} \quad (3.3)$$

Où $t_{0.5}$ est LT50 et C_1 est la constante. La notation pour L_0 et n est inchangée. Le raisonnement continue en établissant que L_0 est directement proportionnel avec la densité de courant. Selon l'équation (3.4), l'article établie la corrélation avec la densité de courant sous une nouvelle équation.

$$t_{0.5} = \frac{C_2}{(j)^n} \quad (3.4)$$

Où C_2 est une constante différente de C_1 et j est la densité de courant électrique appliquée sur l'OLED. Puisque l'article propose qu'il y ait une similitude entre la dégradation par courant électrique et celle par ultra-violet, il pose l'équation suivante.

$$t_{0.5} = \frac{C_3}{(I_{UV})^n} \quad (3.5)$$

Où I_{UV} est l'intensité du rayonnement ultra-violet. Ils ont étudié la dégradation de I_{UV} sur une plage de 61,3 à 166 mW/cm². Les résultats des ALT effectués à ces intensités sont visibles à la figure 3.6.

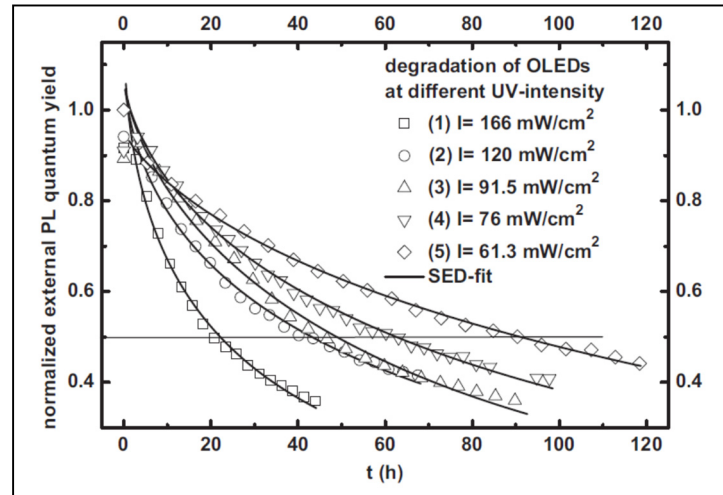


Figure 3.6 Dégradation des OLED bleus à différentes intensités d'UV

Tirée de Seifert *et al.* (2010, p. 2)⁷

Une fois les tests terminés, les LT50 pour chacune des intensités obtenues ont été ainsi insérées dans un graphique présenté à la figure 3.7. Ce graphique montre qu'il est effectivement possible de dégrader des OLEDs avec un rayonnement UV à 367 nm.

⁷ Reproduite de (Seifert *et al.*, 2010) avec la permission de AIP Publishing LLC, <https://doi.org/10.1063/1.3460285>

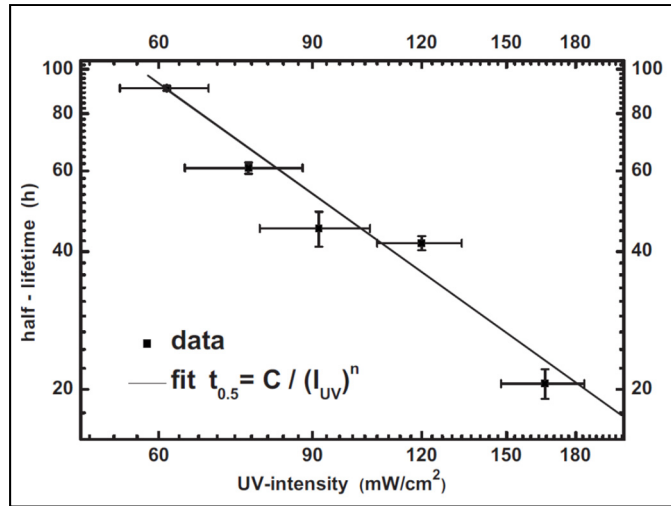


Figure 3.7 Résultats des tests de dégradation des OLED exposées aux UV
Tirée de Seifert *et al.* (2010, p. 2)⁸

La droite approximée dans ce graphique log-log a été faite avec l'équation (3.5). Les valeurs publiées pour les paramètres n et C_3 sont respectivement 1,36 et 24 517. Les auteurs ajoutent une comparaison graphique des dégradations induites par courant électrique ainsi que par une exposition aux UV. La figure 3.8 montre qu'il y a en effet une similitude entre les deux dégradations.

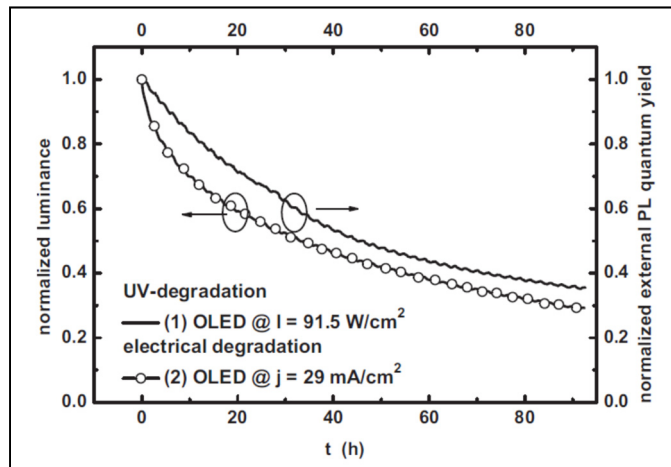


Figure 3.8 Comparaison de la dégradation électrique versus UV
Tirée de Seifert *et al.* (2010, p. 3)⁹

⁸ Reproduite de (Seifert *et al.*, 2010) avec la permission de AIP Publishing LLC, <https://doi.org/10.1063/1.3460285>

Il est aussi mentionné dans cet article que la dégradation aux UV entraîne une augmentation de la luminance de l'OLED au début du test.

3.4 Méthode de tests accélérés

Cette section aborde les méthodes de stress utilisées par les tests ALT et les « Accelerated Degradation Test » (ADT). Les méthodes d'accélération comportent le surstress, augmenter l'utilisation, modifier le facteur de contrôle ou encore réduire le seuil de défaillance. Des méthodes d'accélérations, c'est celle du surstress qui est la plus utilisée (Yang, 2007, p. 241). Les différentes façons d'appliquer le stress:

- constante,
- augmentation par palier,
- augmentation continue,
- par cycle,
- aléatoire.

Il y a des modèles expliquant la relation entre le stress et la durée de vie. Par exemple, la relation d'Arrhenius qui est généralement utilisée pour caractériser les effets de la température sur les réactions chimiques de premier ordre (Yang, 2007, p. 253). La prochaine équation montre justement cette relation.

$$L = A e^{\frac{E_a}{kT}} \quad (3.6)$$

Où L est la durée de vie en heure, A est une valeur constante liée aux propriétés des matériaux, E_a est l'énergie d'activation en eV, k est la constante de Boltzmann et T est la température absolue en Celsius. Puisque la température comme stress est souvent appliquée

⁹ Reproduite de (Seifert *et al.*, 2010) avec la permission de AIP Publishing LLC, <https://doi.org/10.1063/1.3460285>

de façon cyclique pour stimuler les défaillances. Pour ces cas, il y a relation de Coffin-Manson qui est exprimée en variations de température (Yang, 2007, p. 256).

$$L = \frac{A}{(\Delta T)^B} \quad (3.7)$$

Où ΔT est la différence entre la température maximale et minimale, A et B sont des constantes propres aux matériaux de l'échantillon testé, B est généralement positif. Cela étant dit, les échantillons testés sont des OLEDs et une relation liée à la tension électrique pourrait s'avérer pratique. Or, il existe justement une relation durée de vie versus tension électrique avec une équation de puissance inverse, telle que décrite par l'équation suivante (Yang, 2007, p. 259).

$$L = \frac{A}{V^B} \quad (3.8)$$

Où L est la vie nominale, V est la tension électrique, A et B sont des constantes liées à la composition du composant électronique testé. Il faut spécifier que cette relation n'est pas limitée à la tension électrique et peut être utilisée pour d'autres types de stress (Yang, 2007, p. 260).

Lorsque l'ALT est terminé et que les heures de défaillances ont été notées, ces informations peuvent être transcrites dans un diagramme de probabilité afin de voir graphiquement la relation entre le temps et la fonction de répartition cumulée ou «cumulative distribution function» (cdf). Le diagramme de probabilité est un outil visuel, mais il est aussi possible d'utiliser directement les fonctions des différentes distributions. Ces relations peuvent suivre des distributions telles que exponentielle, Weibull, normale et lognormale (Yang, 2007, p. 267 à 269).

Pour l'ADT, le principe reste fondamentalement le même que celui de l'ALT. L'idée est assez simple, utiliser les données récoltées lors du test afin d'approximer l'heure exacte de la mort d'échantillon. En effet, dans un ALT, la mort de l'échantillon est constatée bien après celle-ci. C'est l'avantage d'un ADT, lorsque la caractéristique critique de l'échantillon est

quantifiée lors de l'ADT, une courbe de cette dégradation peut être approximée. En ayant cette courbe, il est facile de calculer l'heure de défaillance de l'échantillon. La loi des moindres carrés ou le « Maximum Likelihood Estimation » (MLE) est généralement préconisé pour le calcul précédemment mentionné (Yang, 2007, p. 334 à 335).

Il y a déjà plusieurs publications sur la question de quantifier et de prédire la durée de vie de la technologie OLED. Ces publications portaient principalement sur le WOLED. Celles citées avaient de neuf à dix échantillons et ont été soumis à trois niveaux de courants continus supérieurs à la valeur nominale recommandée par le fabricant (JianPing Zhang *et al.*, 2012 ; Jianping Zhang *et al.*, 2012 ; Zhang, Li, *et al.*, 2014). Cet auteur a écrit en tout cinq articles dont quatre ont les mêmes données expérimentales. Ceux-ci utilisent différentes approches statistiques afin de prédire la durée de vie des WOLED. Il utilise deux types de distributions dans ses articles, les plus vieux emploient la lognormal tandis que les plus récents sont sous une distribution de Weibull. De plus, les méthodes pour estimer ou traiter les données expérimentales varient d'un article à un autre (JianPing Zhang *et al.*, 2012 ; Jianping Zhang *et al.*, 2012 ; Zhang, Li, *et al.*, 2014).

Il y a aussi un autre article portant sur la prédiction de la durée de vie des OLED en utilisant un ADT. Celui-ci utilise quatre courants continus supérieurs à la valeur nominale. Il y a une dizaine d'échantillons pour chaque courant. Cet article est plus approfondi que ceux publiés par Zhang, car celui-ci présente aussi l'estimation de plusieurs de distributions de durée de vie. Pour être plus précis, ils ont comparé une approximation delta, à imputation multiple, Weibull, lognormal, logspline et Turnbull. Sommairement, leurs conclusions sont d'utiliser le « Lifetime distribution-based » selon certains paramètres et la méthode à imputation multiple aux méthodes plus traditionnelles dans les cas où il y a peu d'historiques sur l'échantillon évalué (Park et Bae, 2010).

CHAPITRE 4

MÉTHODE DE MESURE DE TEMPS DE VIE PROPOSÉE

4.1 Évaluation des dispositifs OLED comme échantillons potentiels

La première chose à déterminer est le dispositif OLED allant servir comme échantillon aux tests de durée de vie. Celui-ci doit répondre à certaines exigences de base afin d'être sélectionnés. D'abord, il faut que le composant organique produisant de la lumière bleue soit présent dans l'échantillon testé. Ensuite, le dispositif doit être un écran dont les pixels sont des OLEDs. Cela exclut les écrans utilisant le WOLED, car ils contiennent des filtres. Cela va définitivement affecter les résultats des tests. De plus, il faut qu'il soit disponible commercialement afin de pouvoir s'en procurer en quantité suffisante pour en créer une population et permettre ainsi une analyse statistique des résultats obtenus. Finalement, le dispositif doit pouvoir être contrôlé afin d'y afficher des patrons de tests à une intensité ou fréquence désirée. Après avoir recherché les différentes options restantes, les prochaines sections montrent les options retenues.

4.1.1 AMOLED petit format

Comme mentionné précédemment, un composant électronique largement commercialisé ayant du AMOLED sont les téléphones portables de marque Samsung. La figure 4.1 montre justement un exemple de ces écrans.



Figure 4.1 Écran Samsung AMS397GE12

Les écrans de téléphone portable sont reconnus pour être souvent endommagés par leur utilisateur. Heureusement pour ceux-ci, il existe des unités de remplacement qui peuvent être réinstallés sur leur téléphone qui lui est toujours fonctionnel. Ce problème récurrent a permis d'obtenir des écrans de type AMOLED en plusieurs exemplaires. Il suffisait d'acheter un téléphone qui allait servir de contrôleur d'affichage. De plus, il existe une application spécifiquement conçue pour tester les écrans des téléphones intelligents nommée « ScreenTestHD ». Après l'avoir installée, les patrons qu'elle affiche semblent convenir aux besoins des tests.

4.1.2 AMOLED grand format

Une autre possibilité est d'obtenir des téléviseurs AMOLED afin d'effectuer des tests de durée de vie. Ceux actuellement sur le marché sont produits par LG et Samsung, mais il y a une alternative canadienne, Ignis Innovation. Cette compagnie située en Ontario offrait des échantillons rectangulaires d'une taille de 55 pouces sur la diagonale. Néanmoins, ceux-ci n'ont jamais répondu à une éventuelle collaboration. Le prix prohibitif des téléviseurs offerts par LG et Samsung ont exclu cette alternative.

4.1.3 PMOLED

Il existe plusieurs écrans PMOLED sur le marché, certains sont vendus en « development kit » afin de faciliter leur utilisation initiale ainsi que la compréhension de leur fonctionnement. Il y a même la compagnie NKK, fabricant d'interrupteurs électrique, qui a intégré des écrans PMOLED à l'intérieur de certains de leurs produits afin de les rendre multifonctionnels. La véritable question était de choisir parmi la pléthore disponible sur le marché. Alors, les choix se sont restreints à ceux qui étaient le moins dispendieux et facile à utiliser. La figure 4.2 montre l'écran qui a été sélectionné comme échantillon pour les tests.

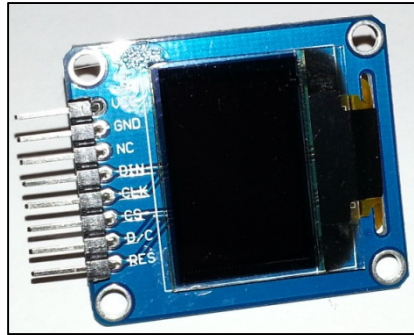


Figure 4.2 Écran PMOLED UG-9664HDDAG01

Cet écran a l'identifiant UG-9664HDDAG01 et est fabriqué par Univision Technology Inc. Celui-ci est monté sur « Printed Circuit Board » (PCB) avec un peu d'électronique afin d'ajuster l'alimentation électrique. Le tout est vendu par Waveshare inc. Afin de le contrôler, il est suggéré sur certains forums d'utiliser un Arduino UNO et de le programmer avec les bibliothèques de fonctions publiques.

4.2 Condition de tests

Grâce à la revue des normes, les conditions idéales pour effectuer les tests ADT seraient dans un environnement où les échantillons sont isolés de toute source de lumière afin d'éviter une contamination externe. Ensuite, la tension électrique ainsi que le courant d'alimentation doivent commencer à des valeurs nominales. S'il y a dégradation, le courant traversant l'OLED va varier aussi. Pour rester à des conditions d'utilisation normales, le circuit électronique de l'écran ne sera pas modifié.

Le centre de l'écran sera aligné avec l'axe optique d'une DEL qui sera la source de lumière. La DEL en question doit être suffisamment proche de l'écran pour exposer qu'un écran à la fois.

La revue de littérature présentée dans cet ouvrage mentionne l'unité de luminance en candela par mètre carré, afin de quantifier la puissance lumineuse créée par un dispositif OLED. Or, cette grandeur physique est en relation avec la fonction d'efficacité lumineuse spectrale qui a

été établie par la Commission internationale de l'Éclairage. La méthode développée dans ce travail de recherche veut se concentrer sur certaines longueurs d'onde bien spécifiques. Cela permet d'écarter la fonction d'efficacité lumineuse spectrale puisque la perception de l'œil humain n'est pas nécessaire. En effet, la luminance est du domaine de la photométrie et celle-ci étudie la perception de l'œil humain aux rayonnements lumineux (Bass *et al.*, 2009, p. 24 à 47). Le domaine plus approprié à ce travail de recherche serait la radiométrie qui mesure les ondes électromagnétiques, et ce même dans le visible. L'équivalent de la luminance en radiométrie est l'irradiance, en watt par mètre carré (Stroebe et Zakia, 1993, p. 115). De plus, les équations identifiées dans la revue de la littérature impliquent la normalisation de la luminance, cela permet d'utiliser une autre grandeur physique telle que l'irradiance.

L'irradiance de la DEL et de l'écran doivent être mesurées à l'emplacement où ils seront utilisés. Cela réduira les erreurs sur l'exposition effectivement reçue par l'écran. Il sera aussi nécessaire de pouvoir contrôler la luminance de la DEL puisque celle-ci sera utilisée à différentes intensités.

Le patron qui devra être affiché est celui d'un échiquier. La raison est simple, il permet de tester simultanément les parties éteintes et allumées de l'écran. À titre de rappel, les parties complètement éteintes d'un écran OLED n'émettent pas de lumière parce qu'ils ne sont pas alimentés électriquement. De part la technologie TFT qui contrôle l'état des pixels, il est possible qu'un très faible courant de fuite traverse la jonction des pixels OLED. Néanmoins, celui-ci a été négligé parce qu'il est si faible que ses effets ne sont pas décelables. La figure 4.3 montre justement l'écran avec le patron en question.

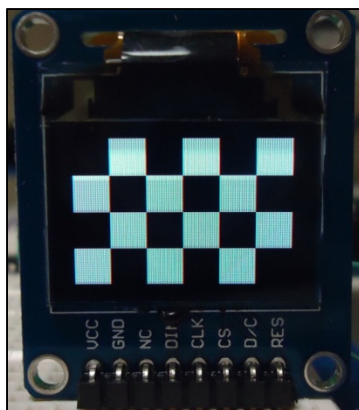


Figure 4.3 Écran PMOLED avec patron d'échiquier

4.3 Résultats de l'approche quasi expérimentale

Le but de ce travail de recherche est de développer une nouvelle méthode pour quantifier la durée de vie d'un dispositif OLED. Sachant cela, il faut en premier lieu déterminer si l'hypothèse est viable ou non. Dans ce cas-ci, utiliser la lumière comme facteur accélérant le vieillissement. Il a donc été nécessaire de simplement aller au laboratoire et d'exposer un écran OLED selon les conditions mentionnées précédemment. S'il y a une forme de dégradation, il sera possible de développer une méthode selon les principes de la photolyse. S'il n'y a aucune forme de dégradation, beaucoup de temps et de ressources pour la planification ainsi que l'élaboration d'un protocole de test seront sauvés.

Alors voici les résultats de l'approche quasi expérimentale, les figures 4.4, 4.5 et 4.6 montrent qu'un écran AMOLED de Samsung peut être affecté par une exposition à la lumière ayant une longueur d'onde à 365 nm à une puissance de 350 mW. La source était une DEL placée à une distance de 3 mm de l'écran et sa puissance a été ajustée en fonction du courant électrique qui la traversait, tel qu'écrit dans sa fiche technique. Ladite DEL était une M365D1 de Thorlabs.

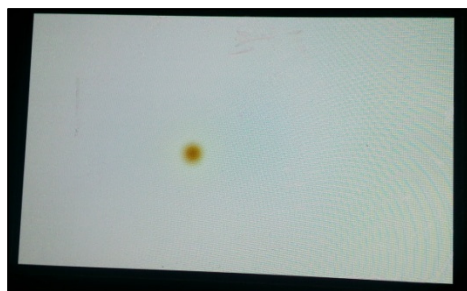


Figure 4.4 Écran de téléphone Samsung après test

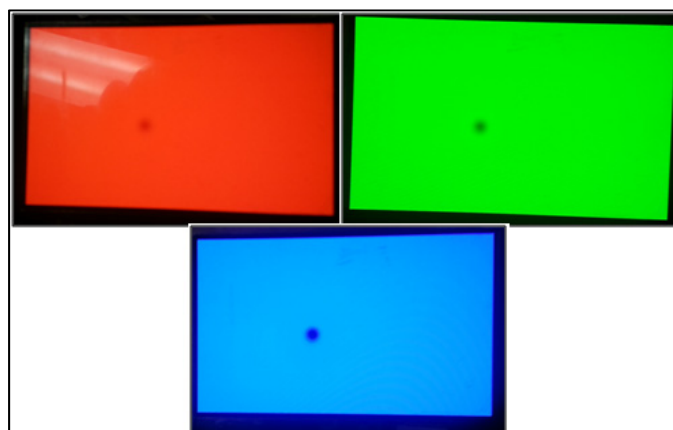


Figure 4.5 Le même écran, mais en rouge, vert, et bleu

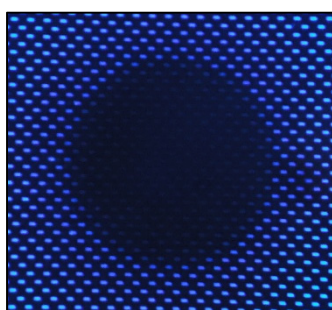


Figure 4.6 Vue rapprochée de la zone d'exposition

La première des figures précédentes montre l'écran après exposition, la zone décolorée située proche du centre est la zone de l'exposition. Celle-ci a été limitée grâce à un masque en feuille d'acier. La figure 4.5 indique les différentes couleurs des sous-pixels, rouge, vert et bleu. L'observation de celle-ci montre que tous les sous-pixels ont été affectés par

l'exposition aux UV. Néanmoins, il y a une détérioration particulièrement accentuée sur le sous-pixel bleu. La figure 4.7 montre une image tridimensionnelle de cette détérioration. Celle-ci a été produite par l'auteur de ce travail de recherche avec le logiciel MATLAB dans le cadre d'un cours de maîtrise en traitement d'images. Il a été proposé que cette dégradation semble suivre la distribution spatiale de la puissance de la LED UV.

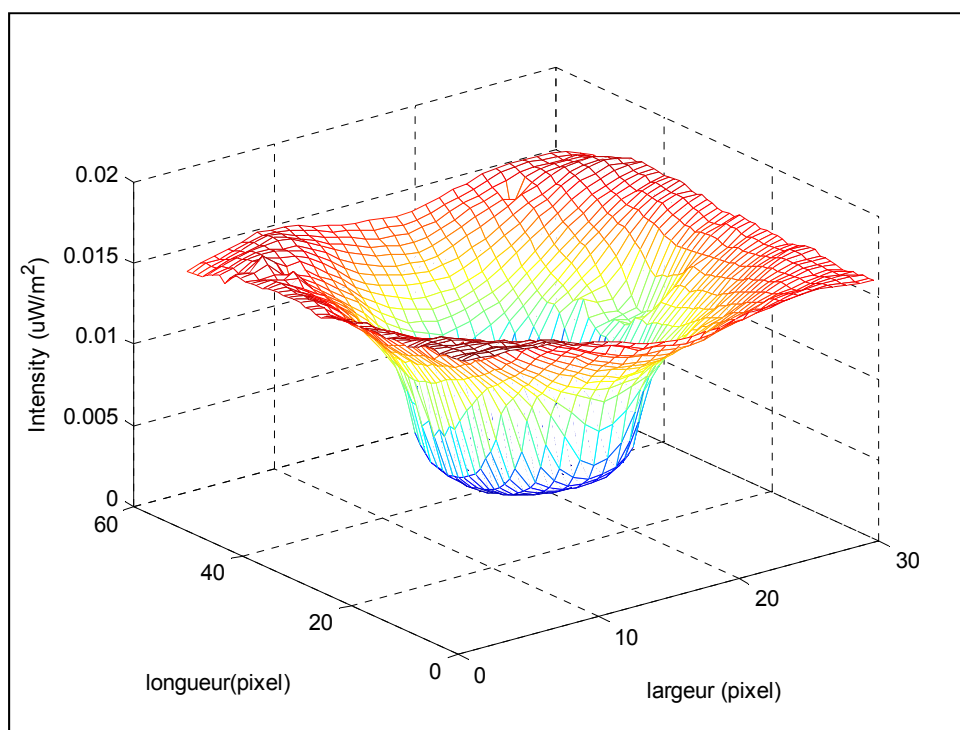


Figure 4.7 Profile d'atténuation de la partie dégradée

La même procédure a été appliquée aux écrans PMOLED spécifié à la section 4.1.3 de ce chapitre. Aucune détérioration ou altération a été visuellement trouvée ou mesurée après l'exposition. Les mesures en question ont été effectuées avec un spectromètre et un mesureur de puissance calibré. Après inspection de l'écran, un film protecteur a été découvert sur la surface de celui-ci. Au centre de la figure 4.8, il y a un film d'apparence grise et selon l'hypothèse que le fabricant ait voulu protéger son écran contre les rayonnements nocifs, il s'agirait peut-être d'un filtre optique. Conséquemment, la transmittance du filtre a été mesurée et celle-ci apparaît à la figure 4.9. Selon cette figure, il s'agirait bel et bien d'un filtre optique. De plus, la figure 4.8 montre à gauche un écran intact et à droite un autre écran

dont le film a été retiré. Il est important de mentionner qu'après observation du dit film, celui-ci contiendrait aussi un polariseur. En effet, deux films ont été superposés puis observés à travers d'une source de lumière. Lorsque le premier film est perpendiculaire à l'autre, il n'y a pas de lumière qui les traverse. Ce comportement est typique d'un polariseur.

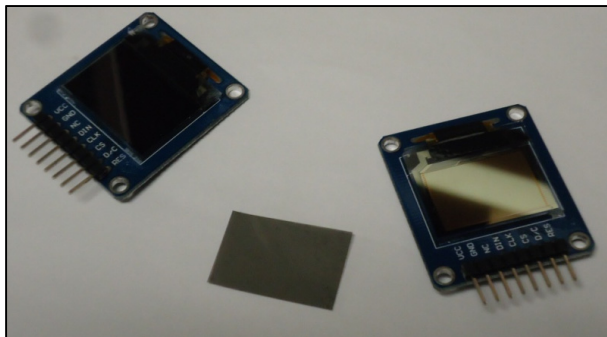


Figure 4.8 Écran PMOLED non modifié à gauche, film au centre, écran PMOLED sans filtre à gauche
Tirée de Fortier et Cloutier (2016, p. 47)¹⁰

Puisque cet écran sera dégradé par photolyse, il était important de bien analyser la transmittance du filtre présenté à la figure 4.9. À défaut d'avoir la mesure exacte à la longueur d'onde de 365 nm, il peut être estimé que la transmittance à cette longueur doit être proche de nulle. Or, il y a des DELs de hautes puissances de 405 nm dans ce laboratoire. L'expérimentation a été répétée avec cette DEL comme source de photolyse. Après tout, d'après les mesures sur la transmittance, il y aurait approximativement 9,9% de transmission à cette longueur d'onde. Cela étant dit, la longueur d'onde de 405 nm est techniquement considérée comme faisant parti du visible.

¹⁰ Reproduite de (Fortier et Cloutier, 2016) avec la permission de SCIRP, <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2016.82005>

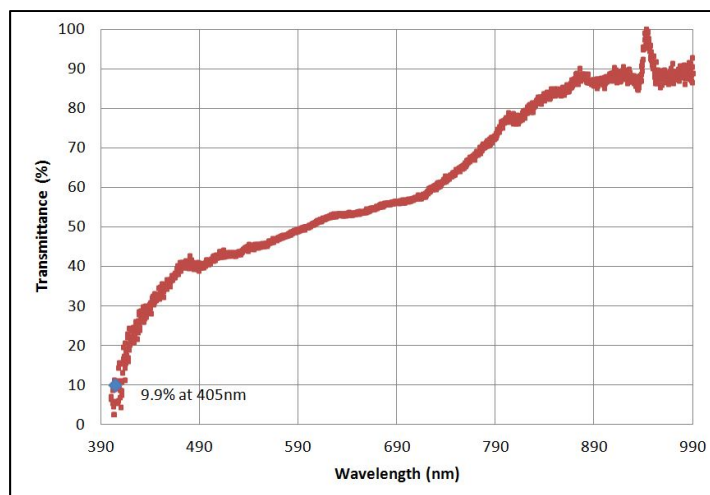


Figure 4.9 Transmittance du filtre sur l'écran PMOLED
Tirée de Fortier et Cloutier (2016, p. 47)¹¹

Lors de ce nouveau test, il a été rapidement observé que l'irradiance diminuait en fonction du temps. Une décoloration était aussi visible à l'œil nu. En effet, dans la zone centrale, l'écran devenait de plus en plus gris, exactement le comportement prévu dans le cas d'une diminution de l'irradiance. Cela amène au fait que cette DEL de 405 nm peut très bien servir de source de photolyse pour les tests de durée de vie. La figure 4.10 montre justement cette dégradation.

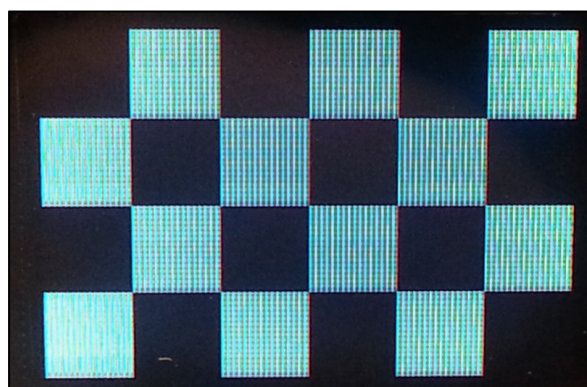


Figure 4.10 Écran PMOLED détérioré

¹¹ Reproduite de (Fortier et Cloutier, 2016) avec la permission de SCIRP, <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2016.82005>

Considérant qu'il s'agit d'écran constitué de pixels RGB et que l'émetteur bleu est connu pour sa durée de vie courte, le spectre optique de l'écran PMOLED a été mesuré. Grâce à un spectromètre USB de marque Jazz de la compagnie Ocean Optics, le spectre normalisé d'un écran est présenté à la figure 4.11. D'après cette figure, le pic du spectre bleu est centré à la longueur d'onde 463 nm. Le vert quant à lui, est remarquable par changement d'inclinaison de la courbe entre 500 et 550 nm. Pour ce qui du rouge, il semble être réparti sur les pics situés entre 600 et 700 nm.

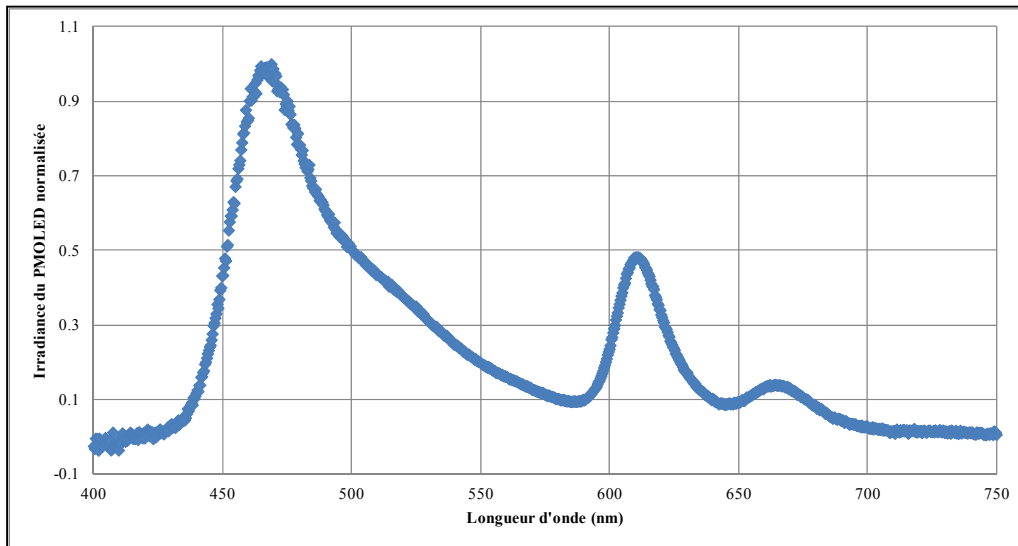


Figure 4.11 Spectre optique normalisé de l'écran PMOLED

Après quelques mesures supplémentaires, une variation a été relevée. En effet, les différents pics se déplaçaient de quelques nanomètres selon l'endroit, sur l'écran, où la mesure a été prise. Selon une moyenne d'une centaine de spectres, les variations se sont atténuées. Afin de confirmer ce résultat, plusieurs autres centaines de spectres ont été mesurés avec des paramètres différents. Leur moyenne donnait sensiblement toujours le même résultat. Bref, selon le spectre optique moyenné obtenu, le pic de la couleur bleu serait à 470 nm.

Le fait que l'écran émet deux pics pour la couleur rouge semblait anormal. Afin d'obtenir une certitude sur les mesures, de nouveaux spectres ont été pris respectivement pour les couleurs bleu, vert et rouge. Les figures 4.12 à 4.14 montent justement ces spectres. Ceux-ci

ont été normalisés afin d'éclaircir la représentation graphique. En les comparant avec la figure 4.11, il n'y a pas de doute que sur les plages d'émissions des différentes longueurs d'ondes. De plus, les pixels ont été observés avec un microscope pour valider qu'une seule couleur était allumée lors de la prise des mesures.

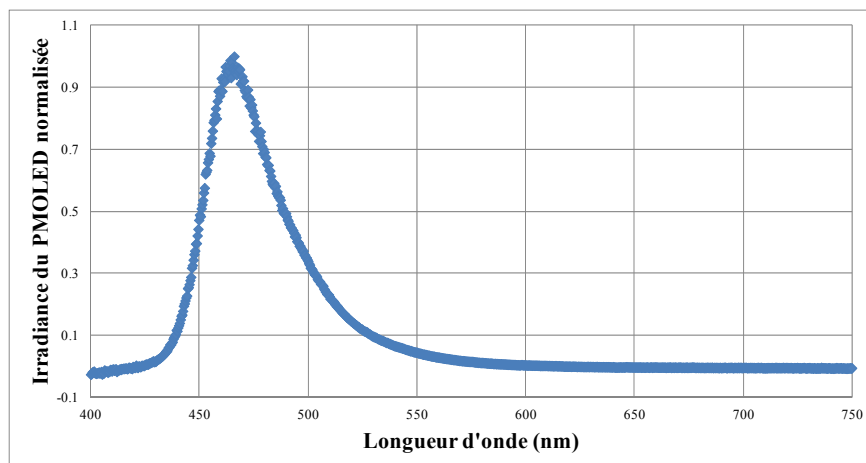


Figure 4.12 Spectre optique normalisé des pixels bleus de l'écran PMOLED

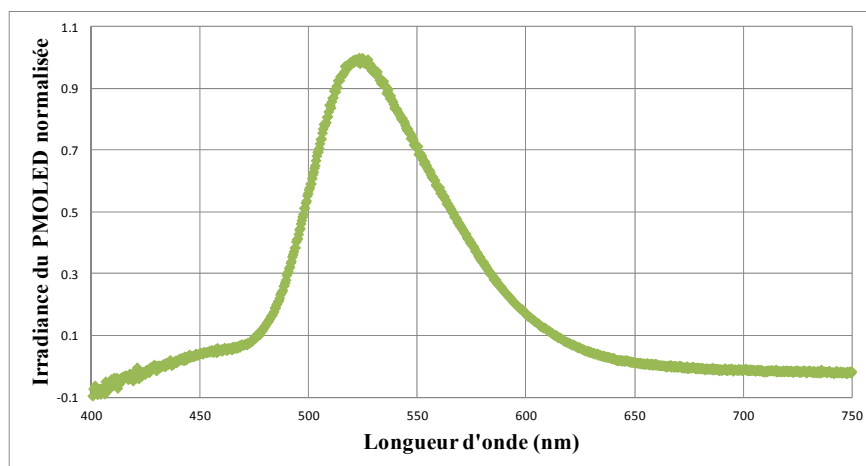


Figure 4.13 Spectre optique normalisé des pixels verts de l'écran PMOLED

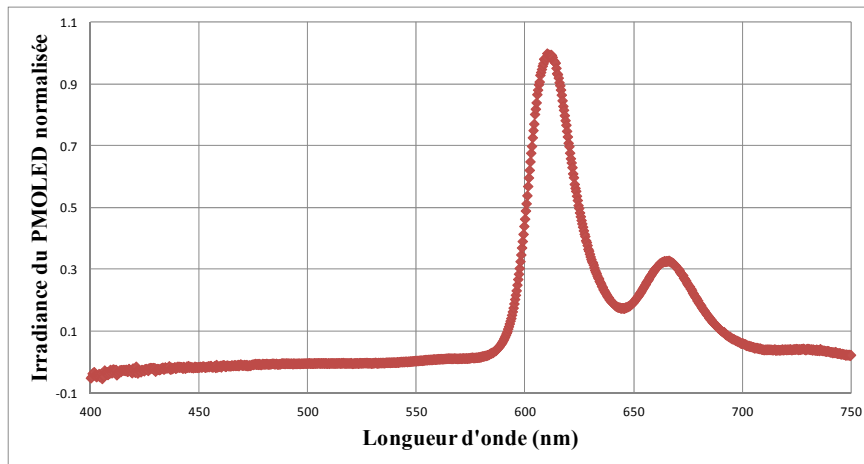


Figure 4.14 Spectre optique normalisé des pixels rouges de l'écran PMOLED

4.4 Méthode proposée

Considérant les ressources disponibles, la méthode proposée consistera à exposer trois écrans PMOLED spécifiés précédemment. D'après les publications, un minimum serait dix écrans, mais le but est de valider qu'il est possible de quantifier la durée de vie avec de la photolyse (Zhang, Liu, *et al.*, 2014, p. 72). Augmenter le nombre d'écrans va simplement rendre l'estimation plus fiable et précise. Ceux-ci seront exposés à des irradiances variant entre 100 mW/m² à 1100 mW/m² à la longueur de 405 nm. Cette plage d'irradiance est dans la même plage que celle publiée précédemment et cela en considérant la conversion d'unité. L'irradiance des écrans devra être mesurée toutes les 24 heures durant le test. Les intervalles de 24 heures ont été déterminés pour leur praticabilité, il est possible de mesurer les irradiances des écrans en moins de 5 minutes. Selon des plans de tests existants, il y a des intervalles de temps particulier où les mesures devraient être faites (Yang, 2007, p. 364). Cependant, la prise des mesures à toutes les 24 h permettent d'accumuler plus de points. Le taux de dégradation étant inconnu, ces points supplémentaires seront pratiques afin d'interpoler le moment où l'OLED aura atteint LT50. La mesure sera faite avec un mesureur de puissance dont la sensibilité aura été spécifiée à la longueur d'onde pic du pixel bleu.

Un écran sera maintenu allumé, mais gardé à l'écart du montage de test. Celui-ci servira de contrôle afin de valider que l'atténuation n'est pas provoquée simplement par son usure normale. Tous les écrans seront allumés durant leur exposition, ceux-ci afficheront le patron d'échiquier. Le test est terminé lorsque l'irradiance du composant atteint 50% de la valeur initiale. L'irradiance doit être mesurée toujours au même endroit sur l'écran et l'emplacement serait au centre. L'utilisation d'un gabarit afin d'aligner l'écran et le photodétecteur est fortement recommandée.

La dégradation au fil du temps sera ensuite analysée pour chaque écran. Leur LT50 sera interpolé en utilisant la méthode des moindres carrés et ces informations seront par la suite traitées selon les approches spécifiées dans le précédent chapitre.

CHAPITRE 5

MISE EN APPLICATION DE LA MÉTHODE

5.1 Préparation du matériel

Le matériel pour le test de dégradation accélérée est relativement simple, mais il est nécessaire d'expliquer comment ils ont été utilisés afin de pouvoir répéter ce test. La liste est présentée ci-dessous :

- boîte noire,
- écran PMOLED,
- Arduino Uno,
- mesureur de puissance Thorlabs SV120c,
- DELs 405 nm et supports,
- contrôleur de courant pour les DELs 405nm,
- un ordinateur.

5.1.1 La boîte noire

Contrairement à ce que la terminologie populaire indique, cela est simplement une boîte de couleur noire opaque. La lumière qui pourrait passer par les interstices ou traverser le matériel de la boîte à des longueurs d'onde à l'extérieur du visible est négligée. L'expérimentation aura lieu à l'intérieur de la boîte afin d'éviter toute contamination de lumière externe. Celle utilisée pour le test a été achetée chez le revendeur Thorlabs. Il s'agit du modèle XE25C9D qui possède deux des portes coulissantes afin de faciliter l'accès au montage de test. La boîte est suffisamment grande pour dissiper la chaleur produite par les DELs hautes puissances de 405 nm. Il est quand même fortement recommandé de mettre un ventilateur pour améliorer la circulation de l'air à l'intérieur de la boîte.

Dans les faits, toute boîte ayant des parois suffisamment épaisses pour bloquer la lumière et qui est assez grande pour contenir le montage de test pourrait convenir. La taille doit aussi tenir compte de la chaleur produite par le test.

5.1.2 Écran PMOLED

Ces écrans ont été détaillés dans les chapitres précédents de ce travail. Ceux-ci sont placés l'un à côté de l'autre sur un « breadboard ». Cela va faciliter leur alignement avec les DELs 405 nm et permettre de les brancher en parallèle. En effet, ce montage de test prévoit que les écrans affichent le même patron et qu'ils soient contrôlés de la même façon afin de réduire les biais lors de l'interprétation des résultats. La figure 5.1 et celle en 5.2 montrent justement la disposition ainsi que les branchements des écrans sur le « breadboard ».

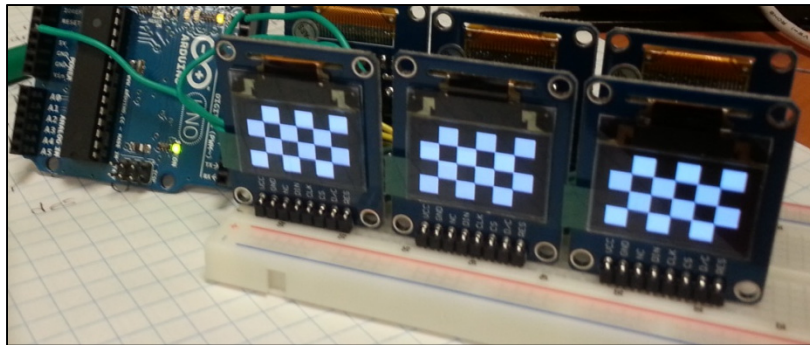


Figure 5.1 Disposition des écrans



Figure 5.2 Les branchements

Les connexions peuvent être faites avec du fil monobrin afin d'être bien branché dans le « breadboard ». La puissance nécessaire pour les écrans est assez basse pour utiliser ce type

de fil. La vitesse de rafraîchissement de l'écran est aussi suffisamment basse pour utiliser ce type de fil. Les branchements nécessaires seront expliqués à la section suivante.

5.1.3 Arduino UNO

Un Arduino Uno est une carte électronique préassemblée et ayant la taille d'un paquet de cartes à jouer. Celle-ci peut être programmée et alimentée par un branchement USB type B. En effet, sur cette carte il y a un microcontrôleur programmable ATmega328 de la compagnie ATMEL. Il y aussi un régulateur 5 volts qui conviendra parfaitement pour alimenter les écrans.

5.1.3.1 Branchements entre les écrans et l'Arduino UNO

Le tableau 5.1 montre la correspondance des branchements entre un écran PMOLED tel que montré à la figure 5.1 sur la gauche et un Arduino UNO.

Tableau 5.1 Branchement entre écran et l'Arduino UNO

Écran PMOLED	Arduino UNO
VCC	5V
GND	GND
NC	Ne pas brancher
DIN	Borne numérique 11
CLK	Borne numérique 13
CS	Borne numérique 10
D/C	Borne numérique 8
RES	Borne numérique 9

L'avantage est que la carte de l'Arduino UNO possède des bornes où il est facile d'insérer du fil monobrin. Étonnement, aucune autre alimentation ou branchement est nécessaire pour faire fonctionner l'écran correctement. Pendant le test, la carte Arduino UNO peut être connectée à un port USB d'un ordinateur ou d'un chargeur qui est conçue à cette fin.

5.1.3.2 Programmation de l'Arduino UNO

Il est de notoriété publique que la compagnie Arduino rend l'implémentation de solution, telle que présentée dans ce travail, plus facile. La procédure peut être directement suivie à partir de leur site internet. Il suffit d'une carte Arduino, un câble USB type B à type A ainsi qu'un ordinateur. Une fois que leur « Integrated development environment » (IDE) est téléchargé et installé, il est possible de suivre pas à pas la marche à suivre afin de comprendre comment le tout fonctionne.

Il existe même des bibliothèques de codes spécialement faits pour les cartes Arduino. Celles-ci sont du domaine public et peuvent être modifiées. Cela étant dit, c'est exactement ce qui a été fait dans ce travail. Une bibliothèque du site Adafruit (PaintYourDragon, 2016), supporte justement le pilote SD1331 de l'écran PMOLED utilisé dans ce travail. Le code créé pour l'affichage du patron d'échiquier est disponible en annexe.

5.1.4 Mesureur de puissance Thorlabs SV120c

Afin de mesurer l'irradiance des écrans ainsi que l'intensité lumineuse des DELs, un mesureur de puissance est nécessaire. Il y en avait un de disponible dans le laboratoire. Celui-ci vient de la compagnie Thorlabs et a un photodétecteur nommé SV120c. Grâce à son contrôleur USB et son utilitaire, la calibration est automatique. Ceux-ci sont respectivement nommés PM100USB et « PM100 Multi Power.exe ». De plus, les valeurs produites par ce mesureur de puissance ont été comparées à d'autres mesureurs de puissance disponibles et la fiabilité de celui-ci a été confirmée. D'après sa fiche technique, le photodétecteur couvre la plage des longueurs d'ondes nécessaires pour les tests. Il est aussi capable de supporter la puissance émise par DELs hautes puissances qui seront utilisées pour dégrader les écrans.



Figure 5.3 Mesureur de puissance Thorlabs

Pour mesurer adéquatement l'irradiance des écrans, il faut que la mesure soit effectuée près de l'écran et toujours au même endroit. L'idéal a été de fabriquer un gabarit simple, mais très utile. La figure 5.4 montre justement ce gabarit qui est composé d'un anneau fileté, d'une feuille coupée d'acier et de deux vis guillotinées. L'anneau en question peut se viser directement sur le photodétecteur. Les deux vis guillotinées permettent d'aligner les écrans PMOLED au photodétecteur.



Figure 5.4 Gabarit pour aligner l'écran au photodétecteur, à gauche le dessous, au centre le dessus, à droite une fois monté

5.1.5 DELs 405 nm et support

La DEL qui sert de source de lumière de dégradation est la LZ1-10UA00-00U8, elle peut utiliser jusqu'à un Watt de puissance électrique. Considérant sa puissance consommée, celle-

ci va chauffer. Il est donc nécessaire que les DELs soient montées sur des drains de chaleurs. Dans ce travail, ces DELs ont été achetées préassemblées sur des plaques d'aluminium et de la pâte thermique a été ajoutée à l'arrière de celle-ci afin d'améliorer l'échange de chaleur entre cette plaque et le support.

Le support est composé aluminium anodisé. Cela permet d'éviter les réflexions qui viendraient des DELs sources. Néanmoins, ce support a été principalement utilisé parce qu'il est disponible. Il est important de mentionner que la distance entre les DELs et les écrans doit être optimisé pour l'exposition. Cela peut être fait par inspection visuelle ou par l'utilisation du mesureur de puissance. Un matériel visiblement opaque peut-être mis entre les DELs afin d'isoler chaque exposition.

La figure 5.5 montre justement le support avec les DELs. Celle-ci montre bien les DELs sources ayant une longueur d'onde 405 nm. Le support était anciennement collé à une structure en équerre qui facilitait l'ajustement de la distance entre ces DELs et les écrans.



Figure 5.5 DELs à 405 nm et support

5.1.6 Contrôleur de courant pour les DELs 405 nm

Comme mentionné précédemment, les DELs émettant à 405 nm ont chacune un contrôle en courant afin d'ajuster la puissance lumineuse de celle-ci. Les DELs sont en règle générale contrôlées en courant afin d'éviter un phénomène connu sous le nom d'emballement

thermique. Dans son usage normal, une DEL va chauffer au fur à mesure qu'elle va émettre de la lumière. Malgré la croyance populaire, les DELs ont un rendement énergétique inférieur à 100% et cela implique qu'une partie de l'énergie fournie à celle-ci est perdue en chaleur. Cette augmentation de température va faire chuter la tension aux bornes de la DEL et par le fait même augmenter le courant qui la traverse. Ayant un courant plus élevé, la DEL va chauffer encore d'avantage, d'où le nom du phénomène « d'emballement thermique » (Arnold, 2011). Le meilleur moyen pour éviter ce phénomène est d'asservir la DEL en courant plutôt qu'en tension. De cette façon, le courant peut-être limité peu importe la température de la DEL. La figure 5.6 montre le contrôle en courant des DELs 405 nm utilisé pour les tests de dégradation.

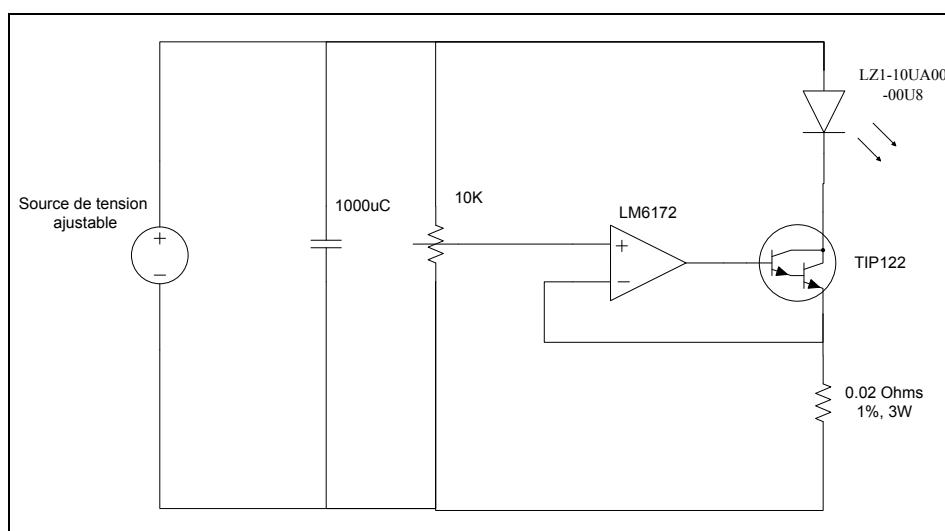


Figure 5.6 Schéma du contrôleur de courant

C'est un montage assez simple qui utilise un transistor de type Darlington TIP122 pour réguler le courant traversant la DEL. L'amplificateur opérationnel LM6172 sert à asservir le transistor et par conséquent maintenir le courant constant. Essentiellement, l'amplificateur opérationnel va compenser le courant au transistor afin que la tension à la résistance en série avec le transistor et le potentiomètre soit la même. Le reste est juste d'utiliser la loi d'Ohm correctement afin de calculer le courant passant par la DEL.

Ce montage doit être dupliqué pour chaque DEL utilisée. Le tout est mis sous tension par un bloc d'alimentation de laboratoire où le courant et la tension sont limités. Celles-ci doivent être à une tension entre 6 à 8 V et le courant maximal est limité à environ 0,7 A par DEL dans le circuit. Ensuite, le courant sera changé pour chaque DEL en fonction de leur irradiance. La figure 5.7 montre une photographie du montage, celle-ci indique la disposition des pièces et la façon dont elles sont arrangées.

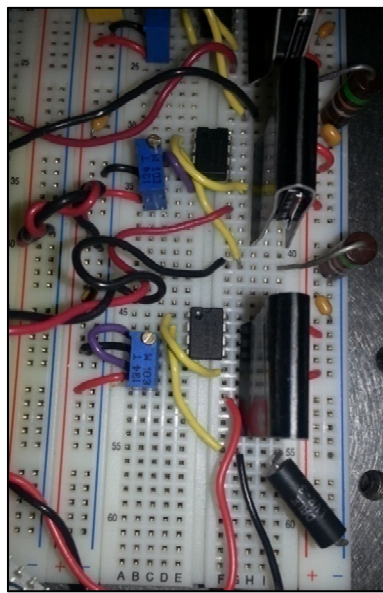


Figure 5.7 Montage du contrôleur de courant

En terminant cette section, les pièces utilisées dans ce montage ont été sélectionnées principalement parce qu'elles sont disponibles dans le laboratoire et qu'elles convenaient à la tâche. Dans les faits, il existe une pléthore de composants qui peuvent tout aussi bien accomplir la même tâche.

5.2 Procédure de test

Une fois le banc de test assemblé et prêt à être utilisé, il faut d'abord allumer les écrans et les laisser en fonction pendant 15 minutes afin qu'ils se stabilisent en température. Pendant ce temps, l'irradiance des DELs à 405 nm peut être vérifiée et ajustée au besoin. La procédure

de test se veut tout aussi simple que les pièces qu'elle utilise. Celle-ci est décrite étape par étape ci-dessous :

1. Numéroté les écrans PMOLED si cela n'est pas déjà fait;
2. Mesurer l'irradiance des écrans et le noter dans un tableur;
3. S'assurer que les écrans sont tous à la bonne distance et allumer avec le patron de test;
4. Brancher le(s) ventilateur(s);
5. Allumer les DELs;
6. Fermer la boîte noire;
7. Attendre 24 h;
8. Recommencer à l'étape 2 si l'irradiance n'a pas atteint 50% de la valeur initiale;
9. Changer la puissance lumineuse des DELs selon l'intervalle précédemment mentionné;
10. Prendre trois, ou plus, autres écrans fonctionnels et recommencer à l'étape 1;
11. Éteignez les écrans, les DELs, ventilateurs et tous autres équipements liés au test.

Ce travail de recherche a déterminé un intervalle de puissance lumineuse des DELs sources de la dégradation. La seule façon viable de déterminer efficacement cet intervalle est d'exposer des écrans et de surveiller la dégradation. Trop intense, l'écran sera dégradé en moins d'une journée. Si c'est trop faible, aucune dégradation ne sera observée avant plusieurs jours ou semaines. L'intervalle doit être peuplé de puissances lumineuses relativement proches l'une des autres, cela va aider à estimer les paramètres qui vont établir la durée de vie.

CHAPITRE 6

RÉSULTATS DES TESTS DE DÉGRADATION

6.1 Observations et présentations des résultats

Il y a deux approches quant à l'observation des résultats des tests de dégradation. La première est de simplement regarder les écrans et de noter les effets de ladite dégradation. La seconde approche est de traiter graphiquement les valeurs de l'irradiance prises lors du test.

6.1.1 Inspection visuelle

Après avoir appliqué la méthode mentionnée dans le chapitre précédent, la première étape serait de simplement regarder l'écran une fois dégradé. Un testeur averti doit se poser la question : Il y a eu une atténuation de l'irradiance, mais comment s'est exprimée cette perte? Après tout, c'est là que réside l'avantage d'avoir arrêté les tests une fois que les écrans ont atteint 50% de l'irradiance originelle, ceux-ci fonctionnent toujours. Malgré leur détérioration, il y a encore suffisamment de lumière pour faire des observations. La figure 6.1 montre justement ce qu'est ladite détérioration.

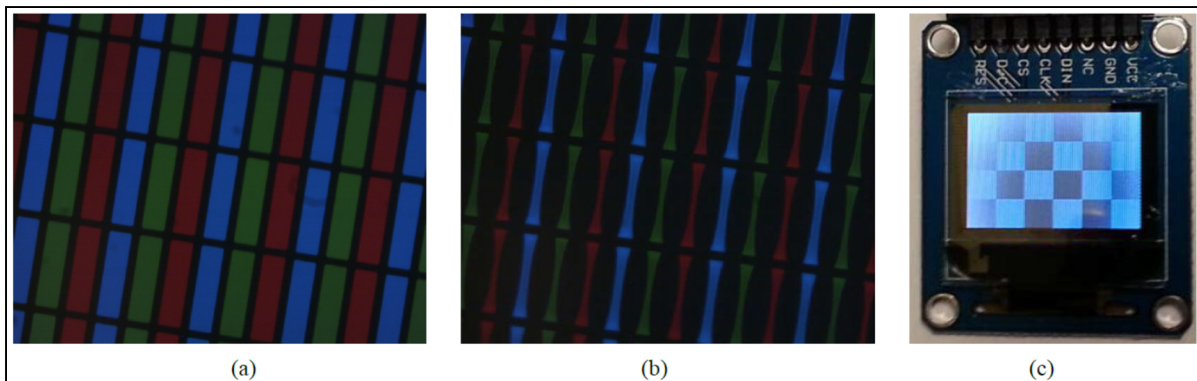


Figure 6.1 (a) Photographie de l'écran PMOLED avant test, (b) photographie après le test, (c) écran avec fond blanc, la dégradation a affecté les pixels actifs lors du test
Tirée de Fortier et Cloutier (2016, p. 49)¹²

En (a), il y a une photographie prise au microscope des pixels d'un écran PMOLED avant le test de dégradation. La partie (b) de la précédente figure montre la même vue qu'en (a), mais après le test. Les pixels sont clairement amincis, passant de rectangle uniforme à une forme squelettique. Le test a érodé les bords des pixels et cela indique que c'est là que le matériel organique fluorescent ou phosphorescent est particulièrement sensible à l'exposition de la lumière. En effet, la géométrie et la disposition des pixels a joué un rôle dans la façon qu'ils se sont détériorés. Malgré que la méthode de fabrication ainsi que les matériaux de l'écran sont inconnus, il est possible d'extrapoler que les bords des sous-pixels auraient servis d'amorce à leur érosion. Cela étant dit, il y a d'autres considérations à tenir en compte, comme l'épaisseur et la répartition du matériel luminescent, l'efficacité de l'encapsulation et les facteurs accélérant tel que la disposition des électrodes. La dernière observation à signaler par rapport à la partie (b) de la figure est que le sous-pixel bleu semble être plus large que le rouge et le vert. En (c), l'écran PMOLED affiche un fond blanc. En effet, l'Arduino UNO a été reprogrammé afin que l'écran n'affiche que du blanc. Par contre, (c) montre clairement le patron de test, mais celui-ci est inversé par rapport à celui utilisé au début du test, tel que montré à la figure 5.1. Cette inversion montre que les parties actives de l'écran lors du test ont été plus affectées par l'exposition que les parties qui étaient éteintes. Il faut aussi ajouter

¹² Reproduite de (Fortier et Cloutier, 2016) avec la permission de SCIRP, <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2016.82005>

que la photographie en (c) montre que les coins de l'écran sont plus lumineux que le reste. La raison est simple, la puissance lumineuse de la DEL à 405nm était principalement orientée vers le centre de l'écran et nettement moins sur le pourtour.

6.1.2 Dégradation l'irradiance des écrans lors du test

La figure 6.2 montre la dégradation de l'irradiance des écrans PMOLED. Tel que le protocole de test stipule, chaque mesure a été prise à des intervalles de 24 h.

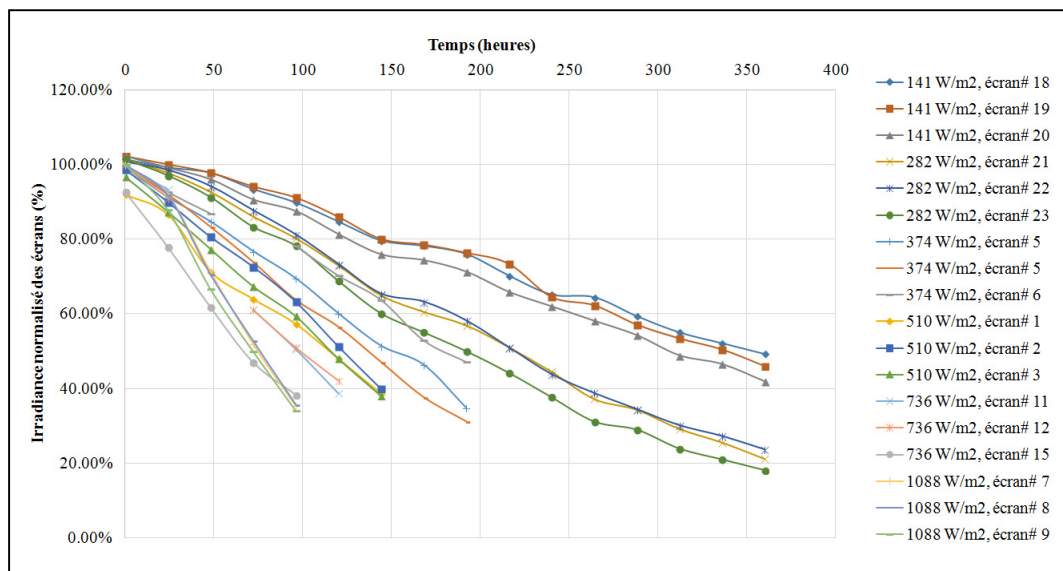


Figure 6.2 Dégradation normalisée en fonction du temps des écrans

Selon cette figure, une tendance est remarquable, plus l'irradiance des DELs à 405 nm est grande plus le temps pour atteindre LT50 est court. Cela est évident, mais les résultats expérimentaux le démontrent bien. Il y a aussi certains résultats qui s'entrecroisent. Afin de simplifier la présentation des mesures, une nouvelle figure, en 6.3, a été créée à partir des moyennes de chaque mesure.

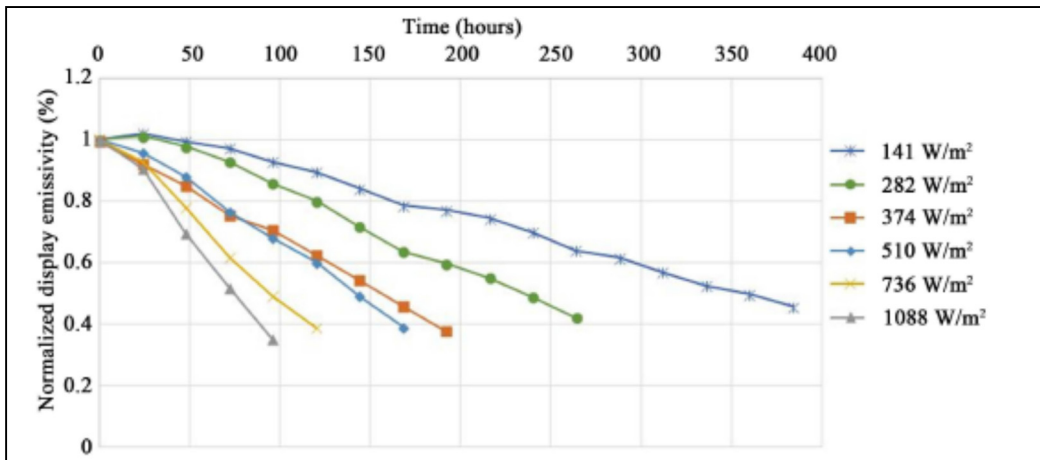


Figure 6.3 Moyennes des mesures normalisées des tests de dégradations
Tirée de Fortier et Cloutier (2016, p. 48)¹³

La tendance mentionnée précédemment est maintenant un peu plus claire. À titre de rappel, les articles abordés lors de la revue de la littérature spécifient que selon la méthode de dégradation accélérée, il faut calculer le moment où l'écran atteint LT50. Cela se fait par interpolation avec la méthode des moindres carrés. Ce calcul est grandement facilité par le logiciel Microsoft Excel qui peut donner directement l'équation et par le fait même les facteurs que le calcul des moindres carrés aurait donné. À partir du graphique, il est possible d'obtenir l'équation pour chacune des courbes. Une fois faite, il suffit de résoudre l'équation sachant que la valeur à l'ordonnée pour atteindre LT50 est 0,5. Avec les courbes du graphique de la figure 6.3, les durées de vie à LT50 des écrans testés sont dans le tableau 6.1.

¹³ Reproduite de (Fortier et Cloutier, 2016) avec la permission de SCIRP, <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2016.82005>

Tableau 6.1 Temps défaillance en fonction des irradiances des DELs à 405 nm
Tiré de Fortier et Cloutier (2016, p. 49)¹⁴

Failure times (hours)	Violet light irradiance (I_v)					
	$I_{v1} = 141.08$	$I_{v2} = 282.16$	$I_{v3} = 374.03$	$I_{v4} = 510.04$	$I_{v5} = 736.73$	$I_{v6} = 1088.09$
t_1	377.29	243.71	167.56	136.80	94.09	76.06
t_2	366.51	246.04	156.07	137.92	96.64	76.09
t_3	336.59	230.00	194.29	135.11	94.78	72.79

Le tableau précédent contient l'information nécessaire pour prédire la durée de vie de l'écran PMOLED testé. C'est avec ces informations que des régressions ainsi que les analyses statistiques peuvent commencer.

6.2 Analyse sommaire de la durée de vie

Tel que montré par Seifert et al, visible à la figure 3.7 de ce travail de recherche, les temps de défaillances des écrans PMOLED après les tests de dégradations peuvent être présentés dans un graphique en échelle logarithmique. À titre de rappel, cela permet d'obtenir une équation linéaire qualifiant la relation entre le vieillissement et l'exposition à un rayonnement détériorant l'OLED testée. Afin d'obtenir l'équation qualifiant ladite relation, un graphique est disponible à la figure 6.4.

¹⁴ Reproduite de (Fortier et Cloutier, 2016) avec la permission de SCIRP, <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2016.82005>

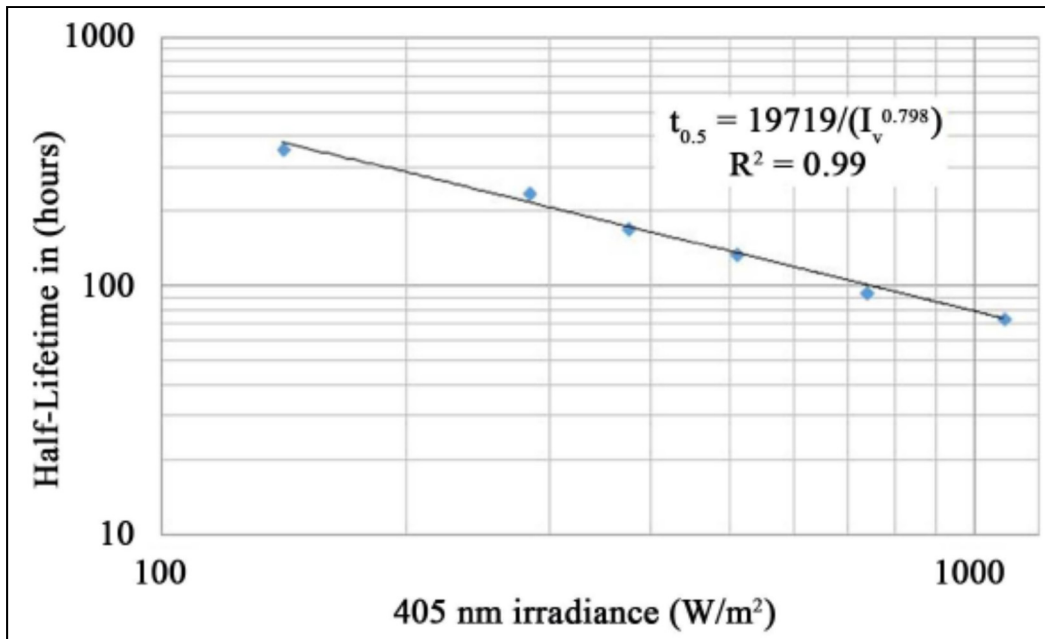


Figure 6.4 Graphique log-log du LT50 des écrans en fonction des irradiances des DELs
Tirée de Fortier et Cloutier (2016, p. 48)¹⁵

Ce graphique montre que les résultats expérimentaux obtenus dans ce travail de recherche sont similaires à ceux produits par Seifert et ses collaborateurs. Les ordres de grandeur ainsi que la pente sont différents de leurs résultats, mais il faut considérer que les dispositifs sont différents. D'après l'équation (3.5), les paramètres caractérisant la dégradation seraient respectivement $n=0,798$ et $C_3=19719$. Ayant ces paramètres ainsi que cette équation, il reste seulement à déterminer la variable I_v afin d'obtenir la durée de vie, en usage normal, de l'OLED testée.

¹⁵ Reproduite de (Fortier et Cloutier, 2016) avec la permission de SCIRP, <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2016.82005>

CHAPITRE 7

APPROCHES STATISTIQUES

7.1 Analyse statistique des durées de vie

Afin d'obtenir des estimations fiables sur la durée de vie, il faut que les résultats des tests soient traités selon une approche statistique. Cela permettra de valider que les résultats obtenus suivent une ou plusieurs distributions statistiques. Si c'est le cas, il sera alors possible d'émettre des prédictions sur la durée de vie. Selon les articles revus, ceux-ci ayant déjà testés et validés des méthodes ainsi que des distributions basées sur des expérimentations utilisant du OLED (Jianping Zhang *et al.*, 2012 ; Zhang, Li, *et al.*, 2014).

Les distributions en question sont respectivement lognormale et Weibull. Il est aussi possible d'estimer la durée de vie selon les moyennes des résultats. Leur utilisation est expliquée dans les prochaines sections.

7.1.1 MLE avec la distribution Lognormale

D'après les travaux de Zhang et ses collaborateurs, une WOLED suivra une distribution lognormale et une estimation par MLE peut être aussi utilisée. La première étape de la démarche est de calculer la valeur moyenne logarithmique ($\hat{\mu}$) ainsi que l'écart type logarithmique estimé (Jianping Zhang *et al.*, 2012, p. 3402). Ceux-ci peuvent être exprimés comme suit :

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \ln(t_j) \quad (7.1)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n_i - 1} \sum_{j=1}^{n_i} (\ln(t_j) - \hat{\mu})^2} \quad (7.2)$$

Où t_j est le temps de défaillance aux différents niveaux de stress $I_{Vi} = (i = 1, 2, 3, \dots, 6)$ puisqu'il y a en tout six niveaux de stresses utilisés dans cette expérimentation. De plus, il y a trois temps de défaillance pour chaque niveau de stress ($j = 1, 2, 3$) montré au tableau 6.1. Le nombre d'échantillons par niveau de stress est n_i et $n_{1,2,3,\dots,6} = 3$. Les valeurs moyennes logarithmiques des données de tests sont présentées dans le tableau 7.1.

Tableau 7.1 Temps de défaillance
Tiré de Fortier et Cloutier (2016, p. 50)¹⁶

	Violet light irradiance (I_v)					
	$I_{v1} = 141.08$	$I_{v2} = 282.16$	$I_{v3} = 374.03$	$I_{v4} = 510.04$	$I_{v5} = 736.73$	$I_{v6} = 1088.09$
$\hat{\mu}$	5.885	5.48	5.147	4.917	4.569	4.317
$\hat{\sigma}$	0.059	0.036	0.112	0.010	0.024	0.025

Selon cette approche, il est assumé que l'équation caractérisant la vie accélérée de l'OLED est de forme d'une puissance inverse. Celle-ci est montrée ci-dessous :

$$\mu = \alpha + \beta \cdot \ln(I_{Vi}) \quad (7.3)$$

Où α et β sont les paramètres qui caractérise l'accélération de la dégradation. Toujours selon les travaux Zhang et al, il est présumé que $\hat{\mu} = \mu$. La loi des moindres carrés peut être appliquée sur les données de tests afin d'obtenir ces paramètres. Selon les valeurs moyennes logarithmiques ($\hat{\mu}$) du tableau 7.1 ainsi que les logarithmes des niveaux de stresses I_{Vi} , le tout est présenté par la figure 7.1 afin de faciliter la compréhension des calculs impliqués.

¹⁶ Reproduite de (Fortier et Cloutier, 2016) avec la permission de SCIRP, <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2016.82005>

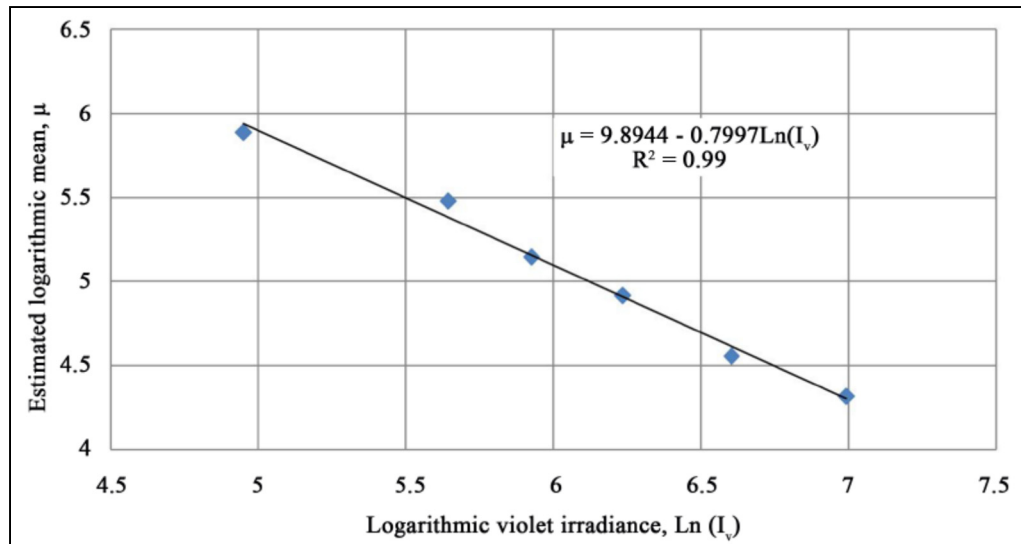


Figure 7.1 Représentation paramétrique lognormale et approximation d'une loi de puissance inverse
Tirée de Fortier et Cloutier (2016, p. 50)¹⁷

La figure précédente montre bien qu'une régression par la loi des moindres carrés donnerait les paramètres α et β qui sont respectivement 9,894 et -0,7997. Ayant ces paramètres, il suffit de déterminer un niveau de stress I_{Vi} considéré comme étant d'un usage normal, puis de recalculer l'équation (7.3). Ce résultat sera le logarithme de la moyenne estimée de la référence, identifié par μ_0 (Zhang et coll. 2012, 3403). La durée de vie moyenne $\bar{\mu}$ et la médiane de survie $t_{0.5}$ peuvent ainsi être calculées avec les équations suivantes :

$$\bar{\mu} = e^{(\mu_0 + \frac{1}{2}\hat{\sigma}_0^2)} \quad (7.4)$$

$$t_{0.5} = e^{(\mu_0)} \quad (7.5)$$

Où l'écart type logarithmique estimé ($\hat{\sigma}$) est considéré égale à $\hat{\sigma}_0$ (Zhang et coll. 2012, 3403).

¹⁷ Reproduite de (Fortier et Cloutier, 2016) avec la permission de SCIRP, <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2016.82005>

7.1.2 La loi des moindres carrés avec la distribution Weibull

La distribution de Weibull peut être exprimée de la façon suivante :

$$F_i(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{m_i}}, \quad t > 0, \quad (7.6)$$

Où le niveau de stress est I_{Vi} ($i = 1, 2, 3, \dots, 6$) et t est le temps de défaillance. Les variables m_i et η_i vont respectivement affecter la forme ainsi que la taille de la courbe de la fonction de densité de probabilité (Zhang, Liu, *et al.*, 2014, p. 72).

Puisque la méthode de dégradation ne change pas, il est assumé que la variable de forme restera inchangée (Zhang, Liu, *et al.*, 2014, p. 72), donc :

$$m_0 = m_1 = m_2 = \dots = m_6 \quad (7.7)$$

Il est aussi assumé que la loi des carrés inverse peut être utilisée pour caractériser l'accélération de la dégradation de l'OLED (Zhang, Liu, *et al.*, 2014, p. 72), celle-ci est définie comme suit :

$$\ln \eta = \alpha + \beta \ln I_{Vi}, \quad (7.8)$$

Où α et β sont les paramètres estimés de l'accélération. L'équation (7.6) peut être modifiée de cette façon :

$$\ln \ln[1 - F_i(t)]^{-1} = m_i \ln t - m_i \ln \eta_i, \quad (7.9)$$

Les constituantes de cette équation sont séparées comme suit :

$$\begin{aligned} y &= \ln \ln[1 - F_i(t)]^{-1}, & x &= \ln t, \\ a &= m_i, & b &= -m_i, \end{aligned} \quad (7.10)$$

Ce qui fait que l'équation (7.9) serait linéarisée par les égalités mentionnées à l'équation (7.10).

$$y = ax + b \quad (7.11)$$

La fonction de répartition $F(t_{k,j})$ est obtenue par la formule de rang médian suivante. Celle-ci est implémentée de cette façon dans la plupart des logiciels de calculs statistiques. Elle aurait très bien pu être d'une forme différente, mais cette variante est gardée afin de faciliter la répétabilité du calcul (Zhang, Liu, *et al.*, 2014, p. 73).

$$F(t_{k,j}) = \frac{k - 0.3}{n_i + 0.4}, \quad k = 1, 2, \dots, n_i \quad (7.12)$$

Où n_i est le nombre d'échantillons pour chaque niveau de stress I_{Vi} ($i = 1, 2, 3, \dots, 6$), donc $n_{1,2,\dots,6} = 3$. Selon l'équation (7.10) et (7.12), les données de tests seront présentées de la façon suivante :

$$\left(\ln t_{k,i}, \ln \ln[1 - F_i(t_{k,i})]^{-1} \right) = (x_{k,i}, y_{k,i}) \quad (7.13)$$

Il est maintenant possible d'appliquer ces équations et relations aux données de tests afin d'en obtenir l'information significative. Comme à la section 7.1.1 de ce travail de recherche, il est plus direct de présenter ce traitement mathématique par un graphique à la figure 7.2.

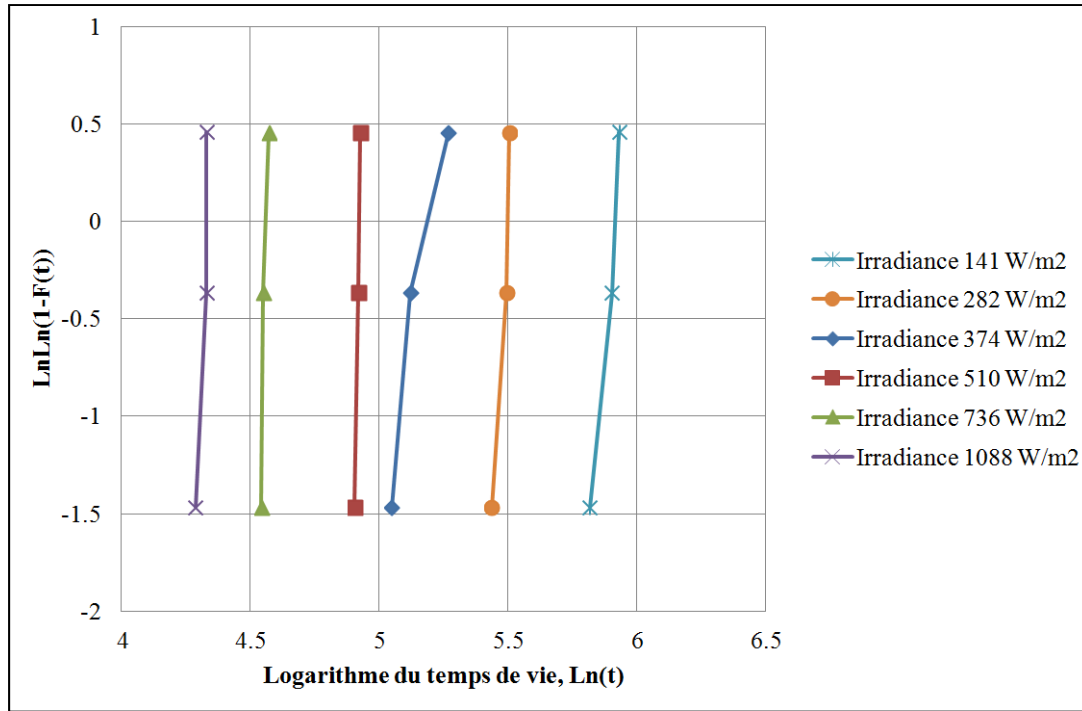


Figure 7.2 Courbes statistiques à stress constant

En appliquant la loi des moindres carrés aux courbes du graphique précédent, il est possible d'obtenir les paramètres a_i et b_i . Voici le calcul nécessaire afin d'obtenir ces coefficients :

$$a_i = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} x_{k,i} y_{k,i} - (\sum_{k=1}^{n_i} x_{k,i} \sum_{k=1}^{n_i} y_{k,i}) / n_i}{\sum_{k=1}^{n_i} x_{k,i}^2 - (\sum_{k=1}^{n_i} x_{k,i})^2 / n_i}, \quad (7.14)$$

$$b_i = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} y_{k,i}}{n_i} - \frac{a_i \sum_{k=1}^{n_i} x_{k,i}}{n_i}.$$

En croisant les équations (7.10) et (7.14), il est possible d'obtenir les simplifications suivantes :

$$m_i = a_i, \quad (7.15)$$

$$\eta_i = e^{-\frac{b_i}{a_i}}.$$

Le tableau 7.2 montre les résultats de ces équations :

Tableau 7.2 Résultats de la loi des moindres carrés sur les données de la figure 7.2

i	1	2	3	4	5	6
I_{Vi}	141,08	282,16	374,03	510,04	736,73	1088,09
$m_i = a_i$	15,97	25,21	8,30	92,99	44,28	34,42
b_i	-94,46	-138,60	-43,18	-457,69	-202,60	-149,06
η_i	370,13	244,21	181,68	137,28	97,10	75,96

Les paramètres de forme η_i pour chacune des expositions I_{Vi} étant calculés, il est maintenant possible de mettre l'emphasis sur l'équation (7.8). La figure 7.3 montre justement cette relation dans un graphique :

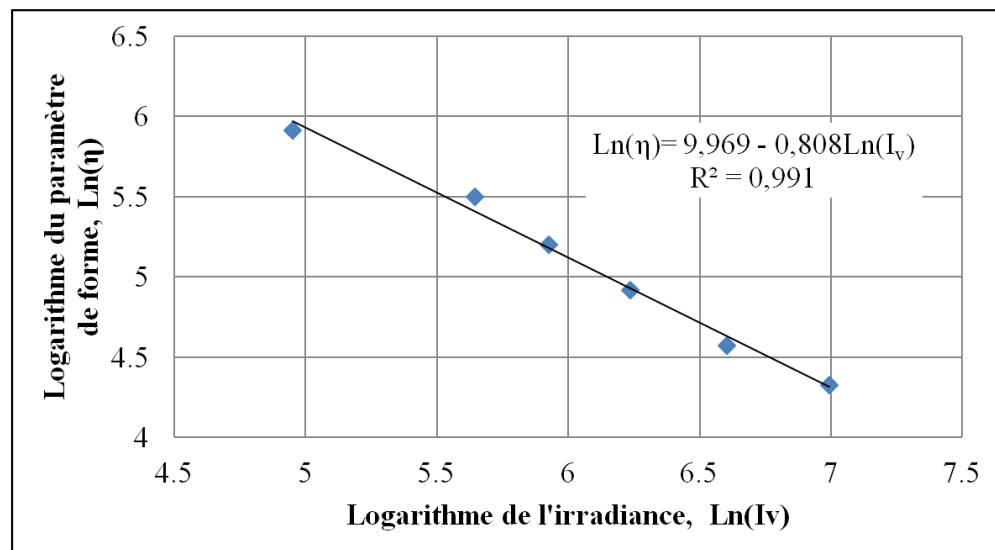


Figure 7.3 Logarithme du paramètre de forme en fonction du logarithme de l'irradiance

Ayant les paramètres de formes et de tailles de la distribution, il devient alors possible d'estimer la durée de vie des OLEDs dans selon un stress donné. Il suffit de déterminer l'irradiance I_{Vi} de référence et de recalculer le facteur de forme η_0 avec l'équation montrée sur la figure précédente. D'après l'assomption mentionnée à l'équation (7.7), le paramètre m est la moyenne pondérée des m_i et il est calculé par l'équation suivante :

$$m = \frac{\sum_{i=1}^k n_i m_i}{\sum_{i=1}^k n_i} \quad (7.16)$$

La durée de vie moyenne peut être enfin calculée avec l'équation suivante :

$$\mu = \eta_0 \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right), \quad (7.17)$$

Où μ est la durée de vie moyenne en heure et η_0 est la taille de la distribution au niveau de stress de référence. Celui-ci est généralement défini comme étant le niveau de stress normal ou usuel dans lequel l'objet testé sera utilisé. De plus, $\Gamma(.)$ est la fonction gamma. Il est aussi possible de calculer la vie médiane $t_{0.5}$ qui est le centre de la distribution des durées de vie tel que montré à l'équation suivante :

$$t_{0.5} = \eta_0 \left(\ln \frac{1}{0.5}\right)^{1/m} \quad (7.18)$$

7.2 Proposition d'une référence à 405 nm pour estimation de la durée de vie normale

Afin de déterminer adéquatement la durée de vie, il est nécessaire de définir une irradiance de référence I_{V0} qui sera représentée une exposition considérée comme normale. Dans les autres cas d'ADT, le courant nominal ou une température ambiante de 25 °C sont utilisés comme référence. Toutefois, le phénomène de photolyse est rarement utilisé pour déterminer la durée de vie du système observé. Alors, il a fallu chercher une irradiance à 405 nm qui servirait de référence et qui serait appuyée par un organisme de normalisation. Selon la revue de la littérature effectuée dans le cadre de ce travail de recherche, quatre normes se sont démarquées. En voici la liste :

- MIL-STD-810G : "Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests";

- IEC 60068-2-5 : “Simulated solar radiation at ground level and guidance for solar radiation testing”;
- ASTM G173-03 : “Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface.”;
- CIE 85-1989 : “Recommendations for the integrated irradiance and the spectral distribution of simulated solar radiation for testing purposes.”.

Quoique la MIL-STD-810G et la IEC 60068-2-5 soient très détaillées, elles indiquent seulement une intensité selon une plage de longueur d’onde. Elles sont respectivement de 400 à 520 nm ayant une irradiance totale de 200,5 W/m² et 400 à 440 nm ayant une irradiance totale de 56 W/m². Cela peut-être adéquat pour un test d’exposition générale, mais il faut une valeur d’irradiance spécifique à 405 nm. Or, l’organisme normatif ASTM a créé une norme sur les irradiances du spectre solaire telle que mentionnée dans la liste précédente.

Selon cette norme, il y a deux cas d’expositions référencées. La première est à un angle de 37° spécialement prévu pour les panneaux solaires et l’autre cas est en exposition directe à la normale de la surface de la Terre. Les irradiances ont été prises au zénith et dans un ciel clair. (ASTM, 2012). Puisqu’un écran OLED n’est pas un panneau solaire, il a été décidé d’utiliser la référence d’une exposition directe à la normale de la surface de la Terre. Après tout, les expositions effectuées étaient aussi à la normale des écrans. La valeur d’irradiance à longueur d’onde 405nm est de 0,8785 W/m² selon cette norme. Maintenant, il est possible de calculer la durée de vie estimée d’un écran PMOLED exposé à cette longueur d’onde.

La norme de la Commission internationale de l’éclairage (CIE) semble être un prédécesseur de la norme ASTM G173. Il est important de mentionner qu’elle offre différentes conditions non représentées dans la ASTM G173. Par exemple, elle tient compte de la présence de nuages ou encore l’épaisseur de l’ozone ainsi que la masse relative de l’air. Malgré cela, elle est plus vieille et moins précise en termes de longueur d’onde que la ASTM G173. Si cette norme était utilisée comme référence dans ce travail de recherche, il faudrait essayer les

permutations des précédentes conditions mentionnées. De plus, il serait aussi nécessaire de faire des interpolations afin d'obtenir la valeur exacte à 405 nm dans certains cas.

Il est important de mentionner qu'un écran PMOLED exposé à la lumière du soleil se dégraderait plus rapidement que seulement à une lumière de 405 nm. L'idéal aurait été de faire les tests de dégradations avec un simulateur solaire, mais ceux-ci sont dispendieux et leur réponse spectrale peut varier selon la qualité de l'instrument. La valeur sélectionnée de la norme ASTM G173 servira de référence à défaut d'en avoir trouvée une plus circonstancielle.

Donc, selon l'analyse sommaire faite au chapitre 6, où I_{V0} serait égale à $0,8785 \text{ W/m}^2$, la durée de vie de l'écran PMOLED serait estimée à $t_{0.5} = 21\,866,5 \text{ h}$. Dans l'approche lognormal expliquée au début de ce chapitre, la durée de vie moyenne $\bar{\mu}$ à serait de $21\,994,8 \text{ h}$ et un temps vie médiane de $21\,974,6 \text{ h}$.

Avec la distribution de Weibull, toujours avec une irradiance de $0,8785 \text{ W/m}^2$, la durée de vie moyenne estimée μ serait $23\,666 \text{ h}$ et un temps vie médiane de $23\,803 \text{ h}$. Afin de résumer les différents temps de vie obtenus, voici le tableau 7.3 contenant toutes les valeurs calculées.

Tableau 7.3 Résumé des durées de vie

Distributions	Vie moyenne (μ)	Temps de vie médian ($t_{0.5}$)
Lognormal	21 994,8 h	21 974,6 h
Weibull	23 666 h	23 803 h

En considérant les différentes estimations de durées de vie présentées, il y a certainement une variation, mais il y a définitivement une ressemblance entre eux. Il est important de mentionner que la fiche technique de l'écran indique que la durée de vie minimale de l'écran à LT50 est de $10\,000 \text{ h}$ en opération. Le fabricant a estimé la durée de vie des écrans par des cycles de température de 70°C à -30°C sur des périodes de 240 h . Il n'y a aucune mention d'une limite supérieure ou d'une durée de vie considérée comme normale. Selon la note 6

présente dans la fiche technique de l'écran testé, il est écrit que la durée vie moyenne en opération à température pièce est estimée par une opération accélérée à haute température. Cette note porte à confusion sur la signification de durée de vie moyenne et minimale dans cette fiche technique. En effet, dans le tableau qui précède cette note, il est clairement inscrit que la durée de vie en opération est classée sous la colonne du « Min ».

Il y a clairement une disparité entre le résultat de ce travail de recherche et celui affiché dans la fiche technique. Néanmoins, il a déjà été prouvé qu'il y a une relation entre la photolyse et l'usage normal d'un écran (Seifert *et al.*, 2010, p. 3). Sachant que le fabricant de cet écran indique seulement la durée de vie minimale en omettant la durée de vie moyenne ou maximale. Il est connu en ingénierie que des marges de sécurité sont ajoutées aux caractéristiques publiées dans les fiches techniques. Une marge de facteur deux est assez répandue, cela expliquerait justement la différence entre la durée de vie trouvée dans ce travail de recherche et celle indiquée dans la fiche technique.

Une autre approche serait de déterminer une référence d'exposition à une longueur d'onde spécifique. Cela serait de faire l'opposé du travail déjà effectué. En effet, le fabricant a déterminé que la durée de vie minimale de l'écran était de 10 000 h. Il suffit maintenant de résoudre numériquement les systèmes d'équations mentionnés dans les sections précédentes de ce chapitre. En utilisant un solveur numérique, il a été calculé qu'un écran PMOLED devrait être exposé à une irradiance à 405 nm de l'ordre $2,31 \text{ W/m}^2$ afin que l'écran ait une durée de vie d'environ 10 000 h. Cette irradiance de $2,31 \text{ W/m}^2$ à 405 nm pourrait ainsi devenir une référence I_{V0} à utiliser dans un ADT pour des dispositifs OLED.

7.3 Validation des résultats

Les articles précédemment mentionnés qui ont été utilisés pour l'analyse statistique des résultats utilisaient le test de Kolmogorov-Smirnov. Ce test permet de déterminer si la durée de vie des OLEDs suit une distribution statistique donnée. Dans le cas de WOLED, il est déjà montré que leur durée de vie peut suivre une distribution lognormal ou Weibull. (Jianping Zhang *et al.*, 2012, p. 3403 ; Zhang, Liu, *et al.*, 2014, p. 74) Afin d'effectuer les tests de

Kolmogorov-Smirnov, l'auteur des articles en question a développé lui-même un programme pour effectuer les calculs à chacun des niveaux de stress. Dans le cas de ce travail de recherche, il a été simple d'utiliser la fonction « kstest2 » présente dans le logiciel de calcul MATLAB. Cette fonction retourne le résultat de l'hypothèse nulle. Le paramètre alpha utilisé dans les références utilisées est de l'ordre de 20% pour des échantillons de petite taille. Les résultats des hypothèses nulles pour les durées de vie utilisée dans ce projet ont retourné la valeur zéro.

Cela veut dire qu'il n'y a rien pour rejeter l'hypothèse nulle et donc, les résultats sont similaires à la distribution lognormal. Considérant les travaux de Jianping Zhang et de ces collaborateurs, les résultats analysés avec la distribution Weibull n'ont pas subi le test Kolmogorov-Smirnov.

De plus, le coefficient de détermination (R^2) des régressions pour estimer la durée de vie des écrans testés variaient entre 0,9 et 1. Cela signifie que les résultats suivent la régression sur l'intervalle observé. Il est aussi possible de soumettre les mesures obtenues aux calculs de Fu-Kwun Wang et al afin d'obtenir des intervalles de confidences. (Wang et Lu, 2015). En effet, celui-ci a réutilisé les résultats produits Jianping Zhang afin de présenter une approche générale pour calculer le MTTF des WOLED. Toutefois, ces intervalles de confidences n'ont pas été calculés parce qu'ils sont redondants considérant les validations ayant déjà été faites.

CONCLUSION

Ce travail de recherche aborde la problématique de quantifier la durée de vie d'un dispositif OLED par photolyse. Cela est motivé par le fait que la technologie OLED évolue rapidement et que la durée de vie est le critère constituant le goulot d'étranglement à son développement. Il est fréquemment mentionné dans la littérature scientifique que le matériau émetteur de la lumière bleu est celui qui a la longévité la plus courte comparativement aux émetteurs rouge et vert. Une méthode a été élaborée afin de potentiellement réduire le temps des tests nécessaires afin de déterminer cette valeur. Les méthodes traditionnelles impliquent d'induire un stress par un courant plus élevé que la normale ou en utilisant des variations en température. L'avantage avec la méthode proposée dans ce travail de recherche est que l'exposition à la lumière peut effectivement créer un stress pouvant accélérer le vieillissement d'un OLED sans avoir recours à des modifications du composant testé ou à l'utilisation de chambre environnementale. En effet, pour effectuer des ADT par photolyse, il suffit d'obtenir de DELs hautes puissances qui serviront de source lumineuse. Un peu d'électronique afin de contrôler ces DELs, une boîte opaque ainsi qu'un ventilateur et l'essentiel du montage de test est là.

Selon une approche quasi expérimentale, des écrans PMOLED ont été soumis à différentes sources de lumière ayant leur longueur d'onde spécifique. La première utilisée a été dans l'ultra-violet, selon le postulat que les matériaux organiques sont susceptibles à ce type de rayonnement. Après une exposition à une longueur d'onde de 365 nm, les résultats ont mené à une observation plus approfondie de l'écran testé. Celui-ci est protégé par un filtre dont la transmittance a été mesurée. Il s'avère que ce filtre atténue de façon significative le rayonnement ultra-violet. La transmittance indiquait aussi que le spectre visible traverserait le filtre. Cela a mené à utiliser une DEL émettant à 405 nm, dans le violet. Un essai a montré que l'écran se dégrade lorsqu'exposé à cette longueur d'onde. Un plan de tests a été proposé dans ce travail de recherche afin de valider que la durée de vie d'un composant OLED pouvait effectivement être estimée en utilisant la photolyse comme facteur de stress.

Une observation des échantillons ayant subi le test montre que les parties actives lors du test se sont grandement plus détériorées que les parties inactives. Lorsque vu sous un microscope, les pixels sont en apparences émaciés et érodés sur la longueur. Des données expérimentales ont été accumulées et traitées selon les modèles d'ADT ayant été précédemment utilisés pour des WOLED. En utilisant la méthode des moindres carrée, les durées de vie des échantillons ont été calculées et reportées dans un graphique log-log en fonction de l'irradiance produite par les DELs à 405 nm. Pour l'étendue observée, selon ce graphique, la relation semblerait être linéaire.

Si l'écran testé fonctionnait dans des conditions identiques à celle d'un panneau solaire selon la norme ASTM G173-03, celui-ci fonctionnerait pour une période moyenne de 21 866,5 h si uniquement exposée à une lumière de 405nm. En utilisant une distribution lognormal et Weibull pour analyser les résultats selon une approche statistique, les temps vie seraient respectivement 21 994,8 h et 23 666 h. Le fabricant de l'écran utilisé pour nos tests spécifie un temps de vie minimal de l'ordre 10 000 h. Il est indiqué dans la fiche technique une température de référence de 25°C comme condition à la durée de vie, cela signifie qu'ils ont utilisé des tests de durée de vie par variation thermique. Dans le cas échéant où la durée de vie référence serait de 10 000 h, il faudrait que l'écran soit exposé à une irradiance de 2,31 W/m² à une longueur d'onde de 405 nm. Cette irradiance de 2,31 W/m² pourrait justement servir de référence pour des tests futurs ou même être une prémisse pour une norme d'exposition à la lumière. La validité des données a été vérifiée par le test Kolmogorov-Smirnov dont le résultat indique que les données suivent une distribution lognormal.

RECOMMANDATIONS

Maintenant que des données ont été accumulées sur la dégradation de la technologie PMOLED, il est possible de sélectionner un plan de tests pour les ADT. En effet, les données recueillies permettront d'établir les paramètres à la sélection d'un plan de tests robustes. De plus, il serait possible d'améliorer la fiabilité des données en changeant le contrôleur de courant utilisé pour alimenter les DELs. Celui qui a été construit pour ce travail de recherche peut varier en courant si la température du Darlington augmente. Ce montage a accompli la tâche prévue, mais est inefficace sur le plan énergétique. Un montage plus complexe, mais plus efficace, serait un convertisseur courant continu de type dévolteur. Ce type de convertisseur est parfois construit avec un contrôleur de courant. Le composant LM3409 du fabricant Texas Instrument serait une bonne piste à explorer pour un nouveau montage plus efficace.

Il serait aussi intéressant d'étudier les effets de la dégradation sur un écran PMOLED d'un autre fabricant ou d'un autre type. Il sera alors possible de comparer les résultats obtenus dans ce travail de recherche et de déterminer s'il y a corrélation.

L'exposition des écrans PMOLED à un rayonnement solaire serait aussi une expérience intéressante à effectuer. Afin que l'environnement soit contrôlé, il faudra que les tests de dégradation se fassent sous un simulateur solaire ayant une irradiance plusieurs fois supérieure à celle du soleil. D'après les tests effectués dans ce travail de recherche, la norme ASTM G173 donne comme référence à 405 nm l'irradiance de $0,8785 \text{ W/m}^2$ et il faudrait une irradiance de $2,31 \text{ W/m}^2$. Donc, le simulateur solaire devrait avoir une irradiance au moins trois fois supérieure à celle du soleil. Ainsi il sera possible de tirer une relation avec les résultats de ces tests et des conditions d'utilisations similaires à ceux d'un panneau solaire.

ANNEXE I

CODE POUR CONTRÔLER L'ÉCRAN PMOLED AVEC UN ARDUINO UNO

/*

Code modifié de la librairie d'Adafruit GFX Graphics.
Les détails du pilote sont ci-dessous dans l'en-tête original.
François-Xavier Fortier
Maîtrise en génie électrique, ÉTS 2015.

*/

/*****

This is a example sketch demonstrating bitmap drawing
capabilities of the SSD1331 library for the 0.96"
16-bit Color OLED with SSD1331 driver chip

Pick one up today in the adafruit shop!
-----> <http://www.adafruit.com/products/684>

These displays use SPI to communicate, 4 or 5 pins are required to
interface

Adafruit invests time and resources providing this open source code,
please support Adafruit and open-source hardware by purchasing
products from Adafruit!

Written by Limor Fried/Ladyada for Adafruit Industries.
BSD license, all text above must be included in any redistribution

The Adafruit GFX Graphics core library is also required

<https://github.com/adafruit/Adafruit-GFX-Library>

Be sure to install it!

*****/

```
#include <Adafruit_GFX.h>
```

```
#include <Adafruit_SSD1331.h>
```

```
#include <SD.h>
```

```
#include <SPI.h>
```

```
// If we are using the hardware SPI interface, these are the pins (for future ref)
```

```
#define sclk 13
```

```
#define mosi 11
```

```
#define cs 10
```

```
#define rst 9
```

```
#define dc 8
```

```
// Color definitions
```

```
#define BLACK    0x0000
```

```
#define BLUE     0x001F
```

```
#define RED      0xF800
```

```
#define GREEN    0x07E0
```

```
#define CYAN     0x07FF
```

```
#define MAGENTA  0xF81F
```

```
#define YELLOW   0xFFE0
```

```
#define WHITE    0xFFFF
```

```
// to draw images from the SD card, we will share the hardware SPI interface
```

```
Adafruit_SSD1331 tft = Adafruit_SSD1331(cs, dc, rst);
```

```

// For Arduino Uno/Duemilanove, etc
// connect the SD card with MOSI going to pin 11, MISO going to pin 12 and SCK going to
pin 13 (standard)
// Then pin 4 goes to CS (or whatever you have set up)
#define SD_CS 4 // Set the chip select line to whatever you use (4 doesnt conflict with the
library)

// the file itself
File bmpFile;

// information we extract about the bitmap file
int bmpWidth, bmpHeight;
uint8_t bmpDepth, bmpImageoffset;

void setup(void) {
  Serial.begin(9600);

  pinMode(cs, OUTPUT);
  digitalWrite(cs, HIGH);

  // initialize the OLED
  tft.begin();

  Serial.println("init");

  // Création du patron de test
  // Couleur de fond
  tft.fillScreen(WHITE);

```

```
//couleur et position des carrés noir de l'échiquier
delay(100);
tft.fillRect(0,0,16,16, BLACK);
tft.fillRect(32,0,16,16, BLACK);
tft.fillRect(64,0,16,16, BLACK);
tft.fillRect(16,16,16,16, BLACK);
tft.fillRect(48,16,16,16, BLACK);
tft.fillRect(80,16,16,16, BLACK);
tft.fillRect(0,32,16,16, BLACK);
tft.fillRect(32,32,16,16, BLACK);
tft.fillRect(64,32,16,16, BLACK);
tft.fillRect(16,48,16,16, BLACK);
tft.fillRect(48,48,16,16, BLACK);
tft.fillRect(80,48,16,16, BLACK);

Serial.println("work as expected -FX");
return;
}

void loop() {
}
```

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AlliedElectronics. 2012. *NKK Switches OLED Rocker Introduction*.
<<https://www.youtube.com/watch?v=b7mRUWiPnxg>>. Consulté le 9 février 2016.
- Allen, N. S., J. Homer et J. F. McKellar. 1977. « Origin and role of the luminescent species in the photo-oxidation of commercial polypropylene ». *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 21, n° 8, p. 2261-2267. <<https://doi.org/10.1002/app.1977.070210823>>.
- Arnold, Rob. 2011. « LED center » What is thermal runaway? » <<http://led.linear1.org/what-is-thermal-runaway/>>. Consulté le 31 mars 2016.
- ASAP. 2016. « Environmental Chamber Maintenance | AES ». <<https://www.associatedenvironmentalsystems.com/services/maintenance>>. Consulté le 28 septembre 2016.
- ASTM. 2012. *Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface*. ASTM International.
- Atherton, Kelsey D. 2014. « Future Airplanes Might Replace Windows With OLED Screens ». In *Popular Science*. <<http://www.popsi.com/article/technology/future-airplanes-might-replace-windows-oled-screens>>. Consulté le 28 septembre 2016.
- Bass, Michael, Casimer DeCusatis, Jay Enoch, Vasudevan Lakshminarayanan, Guifang Li, Carolyn MacDonald, Virendra Mahajan et Eric Van Stryland. 2009. *Handbook of Optics, Third Edition Volume IV: Optical Properties of Materials, Nonlinear Optics, Quantum Optics*, 3 edition. New York : McGraw-Hill Education, 1152 p.
- Blochwitz-Nimoth, Jan, Oliver Langguth, Sven Murano, Gufeng He, Tilman Romainczyk et Jan Birnstock. 2010. « PIN-OLEDs for active-matrix-display use ». *Journal of the Society for Information Display*, vol. 18, n° 8, p. 596-605.
<<https://doi.org/10.1889/JSID18.8.596>>.
- Corning Incorporated. 2016. « Display Glass Technology | Thin-Film Transistor Liquid Display Glass Substrate Technology | Corning ». <<https://www.corning.com/in/en/products/display-glass.html>>. Consulté le 13 avril 2017.
- Digital Trends. 2013. *First Look: Samsung's KN55S9C, a 55" curved OLED television*. <<https://www.youtube.com/watch?v=zyiMTe0woXE>>. Consulté le 9 février 2016.
- DPAT. 2005. *Common Displays Performance Requirements*. D950-10620-1. The Boeing Company, 92 p.

- Féry, C., B. Racine, D. Vaufrey, H. Doyeux et S. Cinà. 2005. « Physical mechanism responsible for the stretched exponential decay behavior of aging organic light-emitting diodes ». *Applied Physics Letters*, vol. 87, n° 21, p. 213502. <<https://doi.org/10.1063/1.2133922>>.
- Fortier, François-Xavier et Sylvain G. Cloutier. 2016. « Constant-Stress Accelerated Degradation Life Test of an Organic Light-Emitting Diode Display under Violet Light ». *Engineering*, vol. 8, n° 2, p. 45-51. <<https://doi.org/10.4236/eng.2016.82005>>.
- French, A. P. et Edwin F. Taylor. 1979. *An Introduction to Quantum Physics*. CRC Press, 700 p.
- Fukagawa, H., K. Watanabe et T. Tsuzuki. 2008. « Highly efficient, deep-blue phosphorescent organic light emitting diodes with a double-emitting layer structure ». *Applied Physics Letters*, vol. 93, n° 13, p. 133312-133312. <<https://doi.org/10.1063/1.2996572>>.
- Ghosh, A. P., L. J. Gerenser, C. M. Jarman et J. E. Fornalik. 2005. « Thin-film encapsulation of organic light-emitting devices ». *Applied Physics Letters*, vol. 86, n° 22, p. 223503. <<https://doi.org/10.1063/1.1929867>>.
- Gold, V. et International Union of Pure and Applied Chemistry. 1987. *Compendium of Chemical Terminology: IUPAC Recommendations*. Blackwell Scientific Publications. <<https://books.google.ca/books?id=ZUN6PgAACAAJ>>.
- Han, Tae-Hee, Youngbin Lee, Mi-Ri Choi, Seong-Hoon Woo, Sang-Hoon Bae, Byung Hee Hong, Jong-Hyun Ahn et Tae-Woo Lee. 2012. « Extremely efficient flexible organic light-emitting diodes with modified graphene anode ». *Nature Photonics*, vol. 6, n° 2, p. 105-110. <<https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.318>>.
- IBISA NANCY. 2013. « Phénomène de fluorescence – diagramme de Jablonsky - PTIBC ». <<http://www.ptibc-imaging.fr/notions-diverses/phenomene-de-fluorescence-diagramme-de-jablonsky/>>. Consulté le 1 mars 2016.

- IGNIS. 2015. « IGNIS secures \$14 million in financing to support product development using True View Display Technology « IGNIS Innovation Inc. »
<<http://www.ignisinnovation.com/archives/announcements/ignis-secures-14-million-in-financing-to-support-product-development-using-true-vision-display-technology>>. Consulté le 12 février 2016.
- IGNIS. 2011. « IGNIS Innovation demonstrates world's first Amorphous Silicon AMOLED product at SID Display Week | IGNIS Innovation ».
<<http://www.ignisinnovation.com/exhibition/ignis-innovation-demonstrates-worlds-first-amorphous-silicon-amoled-product-at-sid-display-week/>>. Consulté le 13 avril 2017.
- Ishii, Masahiko et Yasunori Taga. 2002. « Influence of temperature and drive current on degradation mechanisms in organic light-emitting diodes ». *Applied Physics Letters*, vol. 80, n° 18, p. 3430.
<<https://doi.org/10.1063/1.1476704>>
- Ishii, Masato. 2003. « Luminance decay mechanisms in organic light-emitting diodes ». *R&D Rev Toyota CRDL*, vol. 38, p. 55-60.
- Johnson, Aaron R. 2008. « White-light generation and OLED lifetime issues ». Ph.D., United States -- Michigan, University of Michigan, 206 p.
- Kim, Hye Dong, Jae Kyeong Jeong, Hyun-Joong Chung et Yeon-Gon Mo. 2008. « 22.1: Invited Paper: Technological Challenges for Large-Size AMOLED Display ». *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 39, n° 1, p. 291-294.
<<https://doi.org/10.1889/1.3069649>>.
- Kubo, Nobuhiro et Kiyoshi Takenaka. 2010. « Canon to freeze development of home-use SED TVs ». *Reuters*, (25 mai 2010). <<http://www.reuters.com/article/us-canon-idUSTRE64O03I20100525>>. Consulté le 9 février 2016.
- Laäääperi, Antti, Ilkka Hyytiäinen, Terhi Mustonen et Samu Kallio. 2007. « 30.1: Invited Paper: OLED Lifetime Issues in Mobile Phone Industry ». *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 38, n° 1, p. 1183-1187. <<https://doi.org/10.1889/1.2785521>>.
- ladyada et PaintYourDragon. 2016. « adafruit/Adafruit-GFX-Library ». In *GitHub*. <<https://github.com/adafruit/Adafruit-GFX-Library>>. Consulté le 23 mars 2016.

- Levermore, Peter A., Huiqing Pang, Alexey B. Dyatkin, Zeinab Elshenawy, Prashant Mandlik, Kamala Rajan, Jeffrey Silvernail, Raymond C. Kwong, Ruiqing Ma, Michael S. Weaver, Mike Hack et Julie J. Brown. 2011. « Phosphorescent OLEDs: Enabling energy-efficient lighting with improved uniformity and longer lifetime ». *Journal of the Society for Information Display*, vol. 19, n° 12, p. 943-949. <<https://doi.org/10.1889/JSID19.12.943>>.
- LG UK. 2012. *LG OLED TV - The Ultimate Display*. <<https://www.youtube.com/watch?v=JubFjalFNiY>>. Consulté le 9 février 2016.
- Mertens, Ron. 2014. *The OLED Handbook: A Guide to OLED Technology, Industry & Market*. OLED-Info, 107 p.
- Mertens, Ron. 2015. *The OLED Handbook (2015)*. Lulu.com, 203 p.
- Mertens, Ron. 2016. « Automotive OLEDs: an introduction and market status | OLED-Info ». <<http://www.oled-info.com/automotive-oled>>. Consulté le 28 septembre 2016.
- Mertens, Ron. 2015. « LG announce plans to construct a new \$8.7 billion OLED fab in Paju to make OLED TV and flexible OLED panels | OLED-Info ». <<http://www.oled-info.com/lg-announce-plans-construct-new-87-billion-oled-fab-paju-make-oled-tv-and-flexible-oled-panels>>. Consulté le 12 février 2016.
- Mertens, Ron. 2015. « Merck begins to construct a €30 Million OLED materials production plant in Darmstadt | OLED-Info ». <<http://www.oled-info.com/merck-begins-construct-%E2%82%AC30-million-oled-materials-production-plant-darmstadt>>. Consulté le 28 septembre 2016.
- NewHaven Display. 2016. « OLED ». <<http://www.newhavendisplay.com/oled-c-119.html>>. Consulté le 9 février 2016.
- Nathan, A., A. Kumar, K. Sakariya, P. Servati, K. S. Karim, D. Striakhilev et A. Sazonov. 2004. « Amorphous silicon back-plane electronics for OLED displays ». *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 10, n° 1, p. 58-69. <<https://doi.org/10.1109/JSTQE.2004.824105>>.
- Noda, Makoto, Norihito Kobayashi, Mao Katsuhara, Akira Yumoto, Shinichi Ushikura, Ryouichi Yasuda, Nobukazu Hirai, Gen Yukawa, Iwao Yagi, Kazumasa Nomoto et Tetsuo Urabe. 2011. « An OTFT-driven rollable OLED display ». *Journal of the Society for Information Display*, vol. 19, n° 4, p. 316-322. <<https://doi.org/10.1889/JSID19.4.316>>.

- OSA direct. 2015. « OLEDWorks is expected to invest up to US\$73.6M and create upto 100 new jobs in Rochester ». <<http://www.osadirect.com/news/article/1451/oledworks-is-expected-to-invest-up-to-us736m-and-create-upto-100-new-jobs-in-rochester/>>. Consulté le 12 février 2016.
- Pang, Huiqing, Lech Michalski, Michael S. Weaver, Ruiqing Ma et Julie J. Brown. 2014. « Thermal behavior and indirect life test of large-area OLED lighting panels ». *Journal of Solid State Lighting*, vol. 1, n° 1, p. 7. <<https://doi.org/10.1186/2196-1107-1-7>>.
- Park, Jong In et Suk Joo Bae. 2010. « Direct Prediction Methods on Lifetime Distribution of Organic Light-Emitting Diodes From Accelerated Degradation Tests ». *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 59, n° 1, p. 74-90. <<https://doi.org/10.1109/TR.2010.2040761>>.
- Prasad, Paras N. 2004. *Introduction to Biophotonics*. John Wiley & Sons, 623 p.
- RABEK, Jan F. 2012. *Polymer Photodegradation: Mechanisms and experimental methods*. Springer Science & Business Media, 679 p.
- Raupp, Gregory B., Shawn M. O'Rourke, Curt Moyer, Barry P. O'Brien, Scott K. Ageno, Douglas E. Loy, Edward J. Bawolek, David R. Allee, Sameer M. Venugopal, Jann Kaminski, Dirk Bottesch, Jeff Dailey, Ke Long, Michael Marrs, Nick R. Munizza, Hanna Haverinen et Nicholas Colaneri. 2007. « Low-temperature amorphous-silicon backplane technology development for flexible displays in a manufacturing pilot-line environment ». *Journal of the Society for Information Display*, vol. 15, n° 7, p. 445-454. <<https://doi.org/10.1889/1.2759549>>.
- Salazar, George A. 2013. *Active Matrix Organic Light Emitting Diode (AMOLED) Environmental Test Report*. <<http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20140003471>>. Consulté le 28 septembre 2016.
- Seifert, Ruben, Sebastian Scholz, Björn Lüssem et Karl Leo. 2010. « Comparison of ultraviolet- and charge-induced degradation phenomena in blue fluorescent organic light emitting diodes ». *Applied Physics Letters*, vol. 97, n° 1, p. 13308. <<https://doi.org/10.1063/1.3460285>>.
- Shinar, Joseph. 2004. *Organic Light-Emitting Devices: A Survey*. Springer, 334 p.
- Starr, Cecie, Christine A. Evers et Lisa Starr. 2006. *Biology: Concepts and Applications*. Thomson, Brooks/Cole, 884 p.

- Stewart, Roger G. 2011. « A fast 2-transistor current-mode AMOLED pixel ». *Journal of the Society for Information Display*, vol. 19, n° 7, p. 503-512.
<<https://doi.org/10.1889/JSID19.7.503>>.
- Stroebel, Leslie et Richard D. Zakia. 1993. *The Focal Encyclopedia of Photography*. Focal Press, 944 p.
- Taghi Sharbati, Mohammad, Mohammad Navid Soltani Rad, Somayeh Behrouz, Alireza Gharavi et Farzin Emami. 2011. « Near infrared organic light-emitting diodes based on acceptor–donor–acceptor (ADA) using novel conjugated isatin Schiff bases ». *Journal of Luminescence*, vol. 131, n° 4, p. 553-558.
<<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2010.10.016>>.
- Takatsuka, Hiromu, Matsuhei Noda, Yoshimichi Yonekura, Yoshiaki Takeuchi et Yasuhiro Yamauchi. 2004. « Development of high efficiency large area silicon thin film modules using VHF-PECVD ». *Solar Energy*, vol. 77, n° 6, p. 951-960.
<<https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.06.007>>.
- TalkOLED. 2014. « Kaneka starts producing 50,000 hours (LT70) OLED lighting panel samples | TalkOLED ». <<http://www.talkoled.com/kaneka-starts-producing-50000-hours-lt70-oled-lighting-panel-samples/>>. Consulté le 23 février 2016.
- Tang, C. W. et S. A. VanSlyke. 1987. « Organic electroluminescent diodes ». *Applied Physics Letters*, vol. 51, n° 12, p. 913-915. <<https://doi.org/10.1063/1.98799>>.
- TC 159. 2008. « ISO 9241-305:2008 - Ergonomics of human-system interaction -- Part 305: Optical laboratory test methods for electronic visual displays ». In *ISO*. <http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=40100>. Consulté le 28 septembre 2016.
- Universal Display Corporation. 2015. « Universal Display Corporation ». <<http://www.udcoled.com/default.asp?contentID=604>>. Consulté le 12 décembre 2015.
- Wang, Fu-Kwun et Yi-Chen Lu. 2015. « Useful lifetime of white OLED under a constant stress accelerated life testing ». *Optical and Quantum Electronics*, vol. 47, n° 2, p. 323-329. <<https://doi.org/10.1007/s11082-014-9915-1>>.

- Wouk, Kristofer. 2015. « Samsung brings augmented reality to retail with new mirrored OLED displays ». In *Digital Trends*. <<http://www.digitaltrends.com/home-theater/samsung-transparent-mirror-oled-displays/>>. Consulté le 15 février 2016.
- www.etnews.com. 2014. « A major innovation of the OLED process...a ray of light begins to shine on the next-generation display ». In *대한민국 IT포털의 중심! 이/티/뉴스*. <<http://english.etnews.com/20140630200001>>. Consulté le 28 septembre 2016.
- Yang, Guangbin. 2007. *Life cycle reliability engineering*. Hoboken, N.J : John Wiley & Sons, 517 p.
- Zhang, Jianping, Wenbin Li, Guoliang Cheng, Xiao Chen, Helen Wu et M. -H. Herman Shen. 2014. « Life prediction of OLED for constant-stress accelerated degradation tests using luminance decaying model ». *Journal of Luminescence*, vol. 154, p. 491-495. <<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2014.05.024>>.
- Zhang, Jianping, Chao Liu, Guoliang Cheng, Xiao Chen, Jionglei Wu, Qunzhi Zhu et Laichang Zhang. 2014. « Constant-stress accelerated life test of white organic light-emitting diode based on least square method under Weibull distribution ». *Journal of Information Display*, vol. 15, n° 2, p. 71-75. <<https://doi.org/10.1080/15980316.2014.889613>>.
- Zhang, Jianping, Fang Liu, Yu Liu, H. Wu, Wenli Wu et Aixi Zhou. 2012. « A Study of Accelerated Life Test of White OLED Based on Maximum Likelihood Estimation Using Lognormal Distribution ». *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 59, n° 12, p. 3401-3404. <<https://doi.org/10.1109/TED.2012.2215864>>.
- Zhang, JianPing, TingJun Zhou, H. Wu, Yu Liu, WenLi Wu et Jianxing Ren. 2012. « Constant-Step-Stress Accelerated Life Test of White OLED Under Weibull Distribution Case ». *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 59, n° 3, p. 715-720. <<https://doi.org/10.1109/TED.2011.2181175>>.
- Zone, Chengdu High-tech Industrial Development. 2015. « BOE Launches Gen 6 Line in Chengdu, Firmly Establishing the City as a Worldwide Base for the Photonics Display Industry ». <<http://www.prnewswire.com/news-releases/boe-launches-gen-6-line-in-chengdu-firmly-establishing-the-city-as-a-worldwide-base-for-the-photonics-display-industry-300080163.html>>. Consulté le 12 février 2016.

