



INSTITUT D'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL

CEA-LETI, GRENOBLE

Laboratoire d'Intégration des Technologies Emissives

---

## Rapport de 2<sup>e</sup> année d'alternance :

Intégration, pilotage et test d'instruments de  
mesures photométrique innovants

---

*Auteur :*  
Talla DIAGNE

*Tuteurs :*  
Eric KROEMER  
Mathieu HEBERT

6 août 2024

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>1 Présentation de l'entreprise</b>	<b>2</b>
<b>2 Principe de fonctionnement d'une microLED</b>	<b>3</b>
2.1 Les transitions interbandes . . . . .	3
2.2 Influences des paramètres physiques . . . . .	4
<b>3 Présentation de l'instrument de mesure</b>	<b>4</b>
3.1 Prober TS-3500 . . . . .	4
3.2 Spectro-imageur . . . . .	5
<b>4 Contrôle du support motorisé du spectro-imageur</b>	<b>6</b>
4.1 Design de l'interface et définition des fonctions . . . . .	6
4.2 Fonctions supplémentaires développées . . . . .	7
<b>5 Test et validation du spectro-imageur</b>	<b>9</b>
5.1 Optique . . . . .	9
5.2 Mesures . . . . .	10
5.3 Exemples d'images obtenues . . . . .	12
<b>Rappel des compétences à valider et perspectives</b>	<b>14</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>15</b>

# Table des figures

1	Présentation du CEA . . . . .	2
2	Illustration d'une transition radiative . . . . .	3
3	Photo d'un Prober TS3500 de chez MPI . . . . .	4
4	Design optique du spectro-imageur . . . . .	5
5	Interface graphique pour le pilotage de la platine motorisée . . . . .	7
6	Exemple de courbe de focalisation de la caméra en fonction de la hauteur du support	8
7	Mesures de MTF effectuées sur une mire USAF . . . . .	9
8	Quelques méthodes de mesures de la profondeur de champ . . . . .	10
9	Diagramme de chromaticité du spectro-imageur . . . . .	11
10	Zoom sur les points obtenus . . . . .	12
11	Image brute obtenue avec le spectro-imageur . . . . .	13
12	La même image traitée avec le software . . . . .	13
13	Autre exemple de map . . . . .	14

# Introduction

Avec l'avènement des technologies de communication optique et de la réalité virtuelle/augmentée, il a fallu diminuer la taille des microdisplays pour atteindre quelques micromètres. Au CEA (Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives) de Grenoble, de nouveaux moyens de caractérisations sont mis en place afin de caractériser les microLEDs et microécrans qui sont fabriqués. C'est dans ce cadre que je travaille en alternance au sein du CEA-Leti/DOPT/SNAP/LITE (Laboratoire d'Intégration des Technologies Émissives) sur l'intégration de ces méthodes innovantes de caractérisation dans l'écosystème déjà existant du laboratoire. Je travaille notamment sur le développement de logiciels de pilotage des différents instruments, l'acquisition et l'analyse de données (IVL, spectres, images etc).

## 1 Présentation de l'entreprise

Créé par le général Charles de Gaulle après la seconde guerre mondiale, CEA est un EPIC (Établissement Public à caractère Industriel et Commercial) qui a pour objectif la recherche et l'innovation. Ses missions sont assez transverses et sont au nombre de 6 : les énergies, la défense et la sécurité, la transition numérique, les technologies pour la santé, la recherche fondamentale et l'assainissement/démantèlement. Avec plus de 20 000 salariés répartis sur 9 centres, c'est l'un des plus grands établissements de recherche en France. Celui de Grenoble est lui spécialisé dans les nanotechnologies, les nouvelles énergies, les sciences de la vie et a une réputation mondiale dans le domaine des semi-conducteurs. Il compte à lui seul 6 500 personnes dont 4 500 personnels CEA travaillant dans les 115 laboratoires du centre.

Au vu de sa taille, le CEA est divisé en directions, puis en instituts, en départements, en services puis en plusieurs laboratoires. Le laboratoire LITE où je fais mon alternance est sous la Direction de la Recherche Technologique, puis de l'institut LETI (Laboratoire d'Electronique et de Technologie de l'Information). Il est situé au Département Optique et PhoTonique dans le Service des Nouvelles Applications de la Photonique.

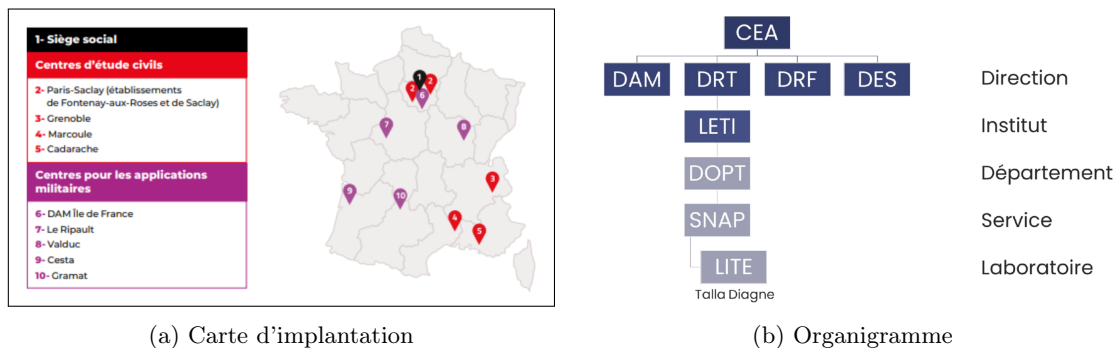


FIGURE 1 – Présentation du CEA

Le LITE, sous la direction de Roch Espiau De Lamaestre, travaille sur les émetteurs microLEDs, OLED et LCD. Du design à la caractérisation en passant par la fabrication en salle blanche, les

thèmes abordés dans le laboratoire sont très transverses. C'est dans la partie de caractérisation que mon travail en alternance intervient et je travaille sur des émetteurs microLEDs. Le but sur le long terme est de développer un microdisplay couleurs à base de GaN alliant une bonne résolution et une très forte luminosité. Chaque pixel du microdisplay ferait jusqu'à  $1\mu\text{m}$  et serait pilotable individuellement par un circuit électronique en fonction de la couleur voulue.

## 2 Principe de fonctionnement d'une microLED

Une LED (Light Emitting Diode, Diode ElectroLuminescente en français) est un semi-conducteur capable d'émettre de la lumière non cohérente lorsqu'il est polarisé en direct. Brevetées pour la toute première fois en 1927 par Oleg Lossev, elles ont dans un premier temps permis l'émission dans l'infrarouge, le rouge, le vert puis dans le jaune. Ce n'est que dans les années 1990 que les travaux de Shuji Nakamura et Takashi Mukai, entre autres, auront permis la production de LEDs bleues puis blanches. Leur utilisation dans divers domaines n'a ensuite cessé de croître : allant de l'éclairage au rétroéclairage d'écrans en passant par la photothérapie.

### 2.1 Les transitions interbandes

Dans les matériaux semi-conducteurs, les électrons se situent dans deux bandes : la bande de conduction (BC) et la bande de valence (BV). Au zéro absolu, la BV est pleine et la BC est vide. Un électron situé dans la bande de valence peut être excité puis passer dans la bande de conduction à condition d'avoir une énergie supérieure à celle de la bande interdite séparant la BV de la BC : c'est l'effet photoélectrique. On appelle ladite énergie nécessaire l'énergie de gap ( $E_g$ ). Ensuite, le passage de l'électron de la BC vers la BV libère de l'énergie sous 2 formes : sous forme de chaleur par des phonons ou sous forme de lumière par des photons. C'est l'effet d'électroluminescence lorsque l'énergie nécessaire est apportée par un électron, et l'effet de photoluminescence lorsque ce processus est réalisé par l'absorption d'un photon.

Les matériaux privilégiés dans le domaine de l'optoélectronique pour la fabrication de LEDs sont ceux à gap direct, c'est-à-dire ceux pour lesquels le minimum de la BC et le maximum de la BV correspondent au même vecteur d'onde  $\vec{k}$  dans la 1<sup>ère</sup> zone de Brillouin. Cela explique pourquoi dans le premier brevet pour une LED, l'utilisation du carbure de silicium (SiC, gap indirect) est à l'origine du faible rendement qui ne dépassait pas les 0,03 % à 430 nm. En effet, comme les deux extrema des bandes ne sont pas alignés dans un semi-conducteur à gap indirect, une transition interbande implique forcément l'intervention de phonons ou encore de défauts cristallins. Ces derniers permettent de conserver le vecteur d'onde et l'énergie puisqu'un photon n'est énergétiquement pas capable de changer le vecteur d'onde. Par conséquent, lors de la désexcitation, toute l'énergie n'est pas transformée en photons mais également en chaleur via les phonons. L'implication des phonons rend le processus plus lent et moins efficace, d'où l'utilisation des semi-conducteurs à gap direct.

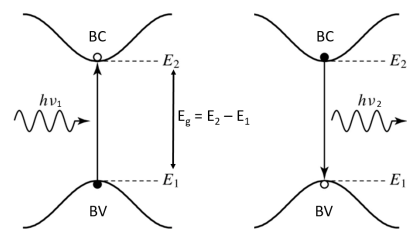


FIGURE 2 – Illustration d'une transition radiative

## 2.2 Influences des paramètres physiques

Les LED modernes utilisent divers matériaux et structures avancées pour améliorer leurs performances. Par exemple, les composés tels que le gallium (Ga), l'indium (In), et l'aluminium (Al) sont couramment utilisés dans les alliages semi-conducteurs comme GaN (nitrure de gallium), InGaN (nitrure d'indium et de gallium) et AlGaIn (nitrure d'aluminium et de gallium). Ces matériaux permettent de moduler la largeur de la bande interdite, ajustant ainsi la longueur d'onde de la lumière émise et permettant de produire des couleurs spécifiques. L'ajout d'indium dans des composés comme l'InGaIn est particulièrement important pour les LED bleues et vertes, car il permet de réduire la largeur de la bande interdite et ainsi d'émettre de la lumière à plus basse énergie (longueur d'onde plus grande). De plus, une réduction de la largeur des puits quantiques permet de confiner les électrons et les trous dans des dimensions réduites, augmentant les probabilités de recombinaison radiative. La longueur d'onde du photon émis dépend donc de paramètres tels que le pourcentage d'indium, la largeur et la polarisation des puits quantiques, permettant un contrôle précis des propriétés optiques des LEDs.

Des LEDs de dimensions microscopiques, appelées microLEDs peuvent ainsi former les pixels individuels d'un écran. Chaque pixel émet donc sa propre lumière et l'utilisation de filtres colorés n'est plus nécessaire. Ces microLEDs sont fabriquées en salle blanche sur des plaques de silicium appelées des *wafers*. Chaque wafer, faisant entre 150 et 300 mm de diamètre, peut contenir plusieurs dizaines de millions de microLEDs organisées en *dies* avec des dimensions et formes variables afin d'étudier l'influence de ces dernières sur les performances.

## 3 Présentation de l'instrument de mesure

Au vu de la taille des composants émissifs et de leur nombre conséquent, il est nécessaire d'utiliser des instruments spécifiques pour pouvoir les caractériser. Dans les laboratoires du LITE, nous utilisons différents types d'équipements de caractérisation. En particulier, le Prober TS-3500 permet de tester électriquement et individuellement les microLEDs directement sur wafer.

### 3.1 Prober TS-3500

Le banc de mesures est constitué d'un Prober TS-3500 de chez MPI. Ce Prober possède des pointes portées par des micropositionneurs avec une précision de déplacement inférieure au micromètre. Cela est nécessaire afin de venir les positionner sur les pads (zones de contact métallique de la microLED représentant l'anode et la cathode) et ainsi établir une connexion électrique. La lumière émise dépend directement de l'intensité du courant traversant le microLED qui elle-même dépend de la tension appliquée entre les pads d'après la loi de Shockley :

$$I = I_S \left( \exp \left( \frac{eV}{kT} \right) - 1 \right)$$

où  $I_S$  est défini par :

$$I_S = eA \left( \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{n_i^2}{N_A} \right)$$



FIGURE 3 – Photo d'un Prober TS3500 de chez MPI

avec  $A$  la section transversale de la jonction PN,  $n_i$  la densité intrinsèque des dopants,  $N_A$  et  $N_D$  la densité des dopants respectivement accepteurs et donneurs  $\tau_n$ ,  $\tau_p$  et  $D_n$ ,  $D_p$  les temps de vie et coefficients de diffusion respectivement des électrons et des trous,  $k$  la constante de Boltzmann,  $T$  la température,  $e$  la charge élémentaire. On peut alors tracer deux courbes caractéristiques de la LED qui sont  $I = f(V)$  et  $L = f(V)$  (où  $L$  est la luminance) : on parle de courbe IVL quand on les superpose.

Le Prober permet d'enchaîner les mesures sur tous les wafers d'un même lot : on dit que c'est un *full automatic*. Un software de chez National Instruments envoie la tension / intensité demandée vers la microLED. Nous trouvons également sur le Prober un spectro-imageur et un microscope d'alignement, reliés par un pont optique permettant de basculer de l'un à l'autre facilement. Le microscope est utilisé afin de poser les pointes et d'allumer la microLED. Quant au spectro-imageur, il s'agit du *X-Scope 400* de chez ELDIM. Dans les parties suivantes, je présente les différentes caractéristiques de ce spectro-imageur, puis celles du support motorisé permettant de le déplacer.

### 3.2 Spectro-imageur

Un spectro-imageur est un instrument optique qui permet de faire à la fois de l'imagerie et de la spectroscopie. L'objectif de cet outil est de pouvoir réaliser des cartographies de luminance sur des microLEDs sur ASIC (Application Specific Integrated Circuits). Au vu des spécifications précisées dans la partie [5], nous pouvons déjà voir qu'il s'agit d'un véritable défi de conception optique. Avec plus de 12 lentilles, ce spectro-imageur permet d'imager un objet faisant jusqu'à  $1 \mu\text{m}$  de dimension sur un champ total de  $8 \times 6 \text{ mm}^2$  avec un grandissement de  $\times 4,5$ . Concernant la spectroscopie, il présente une résolution spectrale qui peut aller jusqu'à  $2 \text{ nm}$  entre  $400$  et  $800 \text{ nm}$ . Un premier design optique nominal sur Zemax (Figure [4]) suivi d'un tolérancement a permis d'optimiser le système optique :

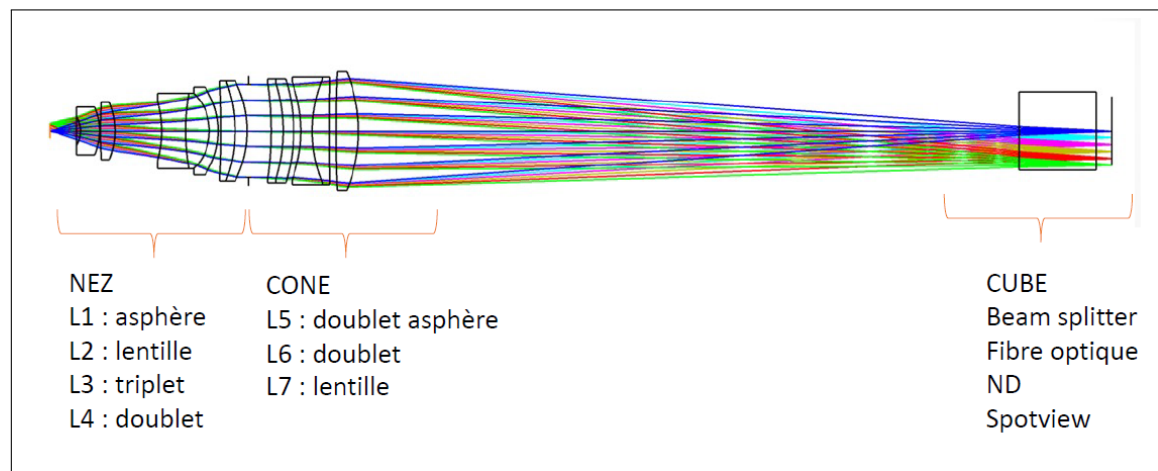


FIGURE 4 – Design optique du spectro-imageur

Il nous est également fourni un logiciel permettant l'analyse automatique des micro-écrans : uniformité, résolution, contraste, défauts, clignotement. L'objectif est de pouvoir contrôler toutes ces fonctions avec Python afin de les centraliser avec tous les autres codes Python de pilotage du

Prober. Nous pourrions ainsi automatiser les mesures sur les wafers, allant de la mesure à l'analyse des données obtenues.

Afin de pouvoir passer facilement du microscope au spectro-imageur, ces derniers sont fixés sur des platines motorisées. La partie suivante est consacrée au contrôle de ce support motorisé.

## 4 Contrôle du support motorisé du spectro-imageur

Chronologiquement, cette partie a été travaillée avant l'arrivée du spectro-imageur. J'ai dû concevoir une interface graphique intuitive permettant de contrôler les déplacements du support au micromètre près. Il fallait également vérifier qu'il était impossible de le déplacer trop loin ou trop bas pour ne pas endommager le spectro-imageur ou le matériel autour.

### 4.1 Design de l'interface et définition des fonctions

Le logiciel que j'ai utilisé pour designer l'interface graphique s'appelle *Qt Designer*. Nous pouvons ensuite faire appel à ces interfaces dans un code Python, en attribuant à chaque bouton des fonctions spécifiques :

```
1 from PyQt5 import uic, QtWidgets
2 import pyqtgraph as pq
3 qtcreeator_file = "file_path.ui"
4 Ui_MainWindow, QtBaseClass = uic.loadUiType(qtcreeator_file)
5 uiclass, baseclass = pq.Qt.loadUiType(qtcreeator_file)
```

Dans un premier temps, j'ai donc dû écrire la librairie de fonctions de bas niveau permettant d'envoyer des commandes simples au moteur mais également de lire ses réponses. Cette partie était peut-être la plus complexe, les commandes étant écrites en SCL (Structured Control Language). Les fonctions de plus haut niveau permettent ensuite d'envoyer des commandes plus complexes : se déplacer de telle distance suivant tel axe, aller à telle position spécifique, aller chercher les senseurs aux bornes etc. La distance à parcourir est communiquée au moteur en unités de *counts* dont la valeur unitaire dépend de la résolution du moteur. Quant à l'interface, elle se présente comme illustré sur la Figure[5] :

Lors de son lancement , tous les boutons se désactivent sauf *Initialization* qui apparaît alors en rouge. Ce dernier permet d'activer le lien avec le support motorisé puis de l'initialiser. Dans un premier temps, il va fixer les limites de déplacement du moteur suivant les 3 axes. Ensuite, toujours pour les 3 axes, il va chercher les positions des capteurs aux limites. Il se place ensuite au milieu pour les axes X et Y puis tout en haut pour l'axe Z. Il est toujours possible de revenir à cette position avec le bouton *Move to reference position*. Il est possible de choisir la vitesse de déplacement du moteur ainsi que la limite de Z. Ce dernier bouton permet d'éviter de trop descendre et éventuellement d'endommager la caméra.

Suivant la page de l'interface sur laquelle on se trouve - millimètres ou micromètres - il est possible de régler le pas de *Jog* et se déplacer de cette distance suivant les 3 axes. Une fonction dans le programme regarde en permanence la valeur de ce pas et peut éventuellement désactiver des boutons si, en se déplaçant de cette distance dans cette direction, les limites peuvent être dépassées. Dans la partie à droite, nous pouvons également effectuer des mouvements absolus en indiquant les positions suivant les 3 axes puis en appuyant sur *Go to XYZ coordinates*. Dans la partie du bas, nous retrouvons un navigateur de texte afin de communiquer des informations utiles à l'utilisateur puis l'affichage de la position exacte du moteur qui s'actualise en temps réel. Lors de la fermeture du

logiciel, une dernière fonction demande à l'utilisateur s'il souhaite ou non réinitialiser les positions du moteur avant de l'éteindre.

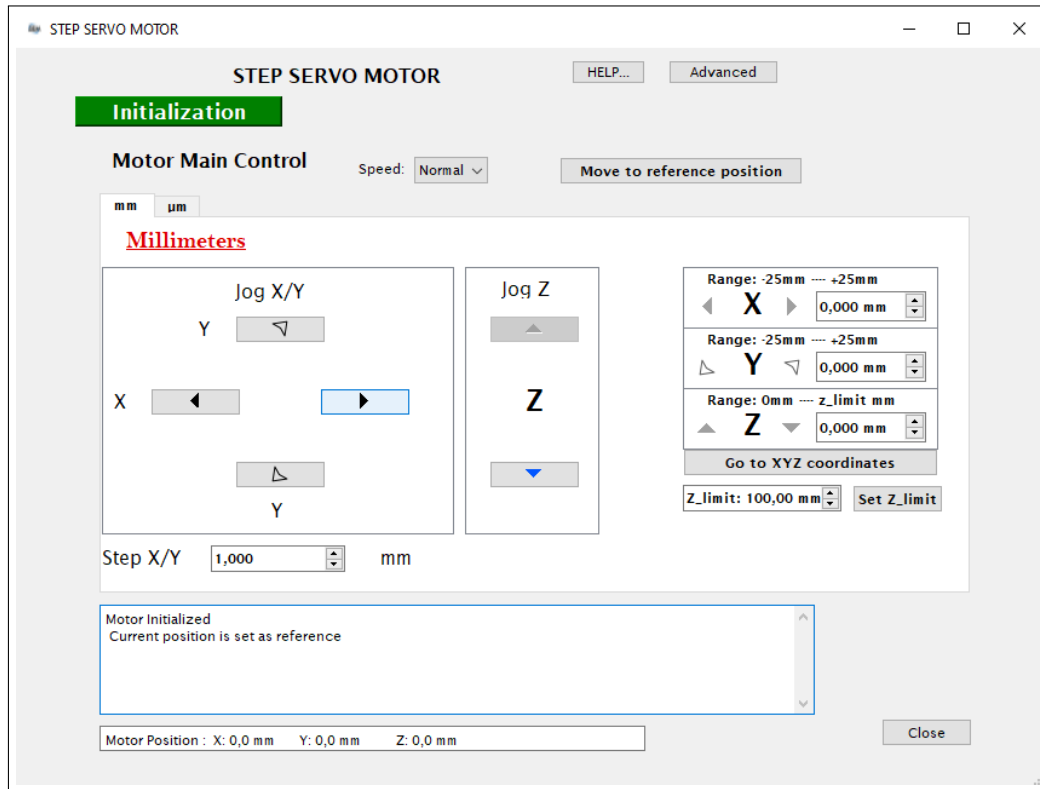


FIGURE 5 – Interface graphique pour le pilotage de la platine motorisée

## 4.2 Fonctions supplémentaires développées

- Fonction d'autofocus : Une manière simple de vérifier le bon fonctionnement de mes fonctions de contrôle est de l'associer à une fonction de mise au point automatique. Cette dernière automatise le processus de mise au point d'une caméra en ajustant sa position sur l'axe vertical, en capturant des images et en analysant leur qualité de mise au point. Elle commence par définir les variables nécessaires, telles que l'axe, les positions limites ainsi que le pas de déplacement. La fonction entre ensuite dans une boucle où la caméra est déplacée par étapes successives : à chaque étape la position actuelle est lue et un score de mise au point est calculé. Ledit score est calculé comme suit : chaque image capturée est d'abord convertie en échelle de gris, puis on lui applique un Laplacien par le biais d'une convolution avec l'un des deux noyaux suivants qui donnent le même résultat :

$$\begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$



Le score correspond ensuite à la variance de l'image obtenue à la sortie : pour une image nette, les variations d'intensité sont abruptes, son Laplacien (i.e la dérivée seconde :  $\Delta f = \nabla^2 f = \nabla \cdot \nabla f$ ) fait ainsi ressortir les bords de l'image de façon plus marquée : sa variance est élevée.

Les positions et les scores de mise au point sont enregistrés, et si le score actuel dépasse le meilleur score enregistré, ce score et la position correspondante sont mis à jour. La boucle se termine lorsque la position dépasse la position de fin. Une fois la meilleure position de mise au point trouvée, la caméra est déplacée à cette position. Un graphique est généré pour visualiser les scores de mise au point en fonction des positions de la caméra : nous pouvons voir sur la Figure [6] la position optimale pour la mise au point correspondant au maximum de la courbe. La fonction gère également les exceptions en capturant les erreurs éventuelles survenues pendant son exécution et en les affichant dans une interface utilisateur ou en les levant pour un traitement ultérieur.

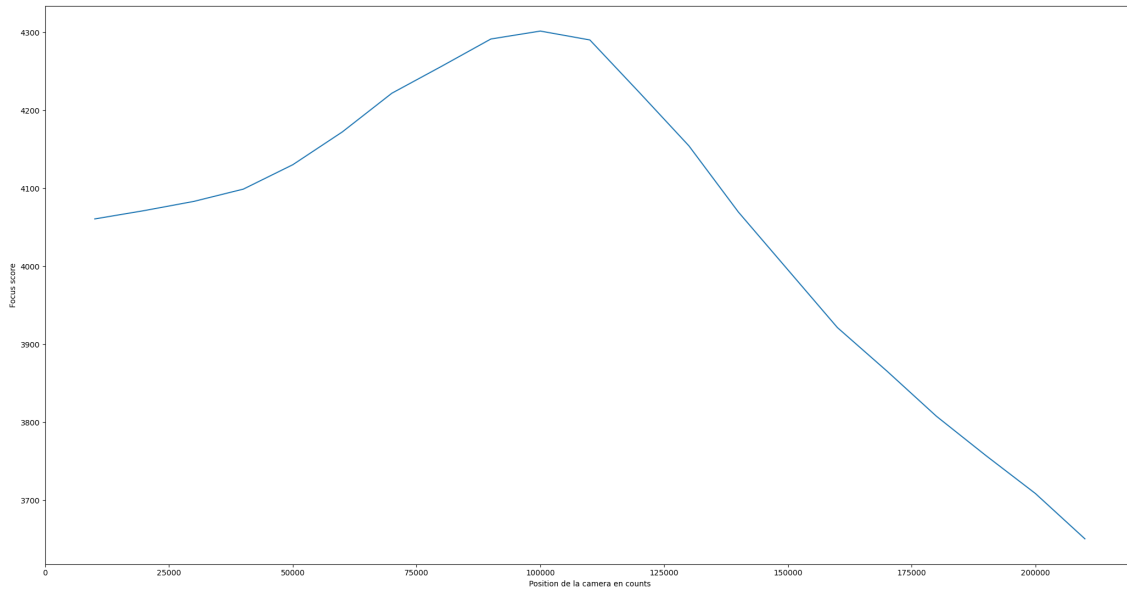


FIGURE 6 – Exemple de courbe de focalisation de la caméra en fonction de la hauteur du support

Une optimisation possible pour cette fonction serait la suivante : dans les cas où nous sommes certains que le meilleur focus est présent dans l'intervalle de positions donné à la fonction, nous pourrions interrompre la fonction dès que la courbe commence à redescendre. Nous diviserions ainsi le temps de traitement par 2 environ. Il est également nécessaire de trouver le temps d'exposition optimal pour la caméra car il s'agit d'un facteur temporel assez limitant ici.

Je propose également la méthode alternative suivante à tester pour effectuer la même tâche :

- ➔ Par le calcul de la moyenne des fréquences de la transformée de Fourier de l'image : une image nette présente plus de détails et donc des fréquences plus hautes

## 5 Test et validation du spectro-imageur

Lors de l'appel d'offres pour le spectro-imageur, un cahier des charges détaillé a été établi afin de garantir la conformité de l'appareil aux exigences de performance et de qualité attendues. Cette partie présente lesdits critères ainsi que les tests et validations effectués pour vérifier que le spectro-imageur répond à ces exigences. Un point vert signifie que la spécification est validée, un point rouge signale une spécification non atteinte, et un point noir désigne les tests qui n'ont pas encore été effectués à la date d'écriture de ce rapport.

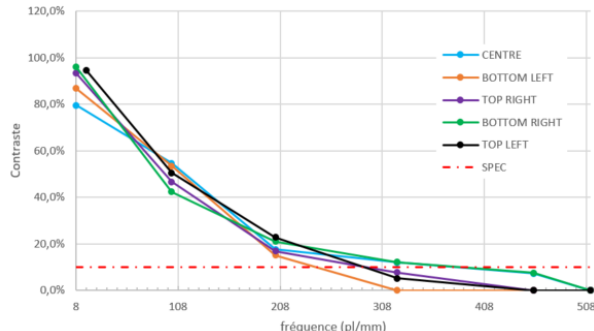
### 5.1 Optique

- Champ optique : au moins  $8 \times 5 \text{ mm} \Rightarrow 8 \times 6 \text{ mm}$
- Taille du plus petit composant mesurable :  $2 \mu\text{m} \Rightarrow$  Plus petite dimension mesurée :  $2,5 \mu\text{m}$
- Résolution du système optique : 10% pour une fréquence de  $\sim 500$  paires de lignes(pl)/mm  $\Rightarrow$  mesurée à  $\sim 300 \text{ pl/mm}$

Après ouverture des images avec le logiciel ImageJ/Fiji, le contraste est calculé manuellement par deux méthodes : en traçant le profil puis avec l'histogramme. La fréquence estimée à 10 % est ensuite moyennée sur les deux méthodes. Notons cependant que globalement celle utilisant l'histogramme donne des résultats beaucoup plus hauts mais donc moins réalistes. La même mesure est effectuée à 5 endroits différents de l'écran : au centre, en haut à gauche puis à droite, et de la même manière en bas. Ces mesures ont ensuite permis de tracer les graphes de MTF ci-dessous (Figure [7]). La MTF, ou Fonction de Transfert de Modulation en français, permet d'illustrer la capacité d'un système optique à transmettre des fréquences de plus en plus élevées.



(a) Fréquence spatiale à 10 % de contraste en fonction de la position dans le champ (méthode profil)



(b) MTF moyenne (méthode profil)

FIGURE 7 – Mesures de MTF effectuées sur une mire USAF

Cette grande différence de performances en fonction de la partie de l'écran étudiée (175 pl/mm entre le minimum et le maximum) pourrait être dû à un problème de réglage du tilt lors de l'autofocus. Les valeurs maximales restent néanmoins bien en dessous de celle demandée.

- Détection de pixel éteint : la luminance mesurée d'un pixel éteint au milieu de 8 pixels allumés doit être inférieure ou égale à 10% de celle des pixels environnants  $\Rightarrow$  Sachant qu'il est encore difficile de contrôler des pixels aussi petits, la méthode la plus simple

serait de designer un masque avec un motif de microLEDs en  $3 \times 3$  avec celui du centre qui n'émet pas de lumière.

- Distance de travail : supérieure à 20 mm  $\Rightarrow$  mesurée à 17 mm ; bien que la spécification ne soit pas atteinte, l'espace est suffisant pour poser les pointes. Un compromis a été trouvé en validant cette spécification.
- Profondeur de champ : Indispensable : supérieure ou égale à  $3 \mu\text{m}$ . Souhaitable : supérieure ou égale à  $8 \mu\text{m}$   $\Rightarrow$   
Plusieurs solutions s'offrent à nous ici pour vérifier la valeur de la profondeur de champ. Il est possible d'acheter des mires commerciales de mesure de profondeur de champ (Figure[8a]). Une autre possibilité serait d'utiliser les mires de Ronchi déjà à notre disposition. Ces dernières présentent des motifs de paires de lignes à une fréquence donnée (entre 50 et 500 pl/mm) et en les inclinant nous pourrions déterminer sur quelle hauteur les paires de lignes sont encore nettes (Figure[8b]) . Nous pourrions également fabriquer une mire avec des "pixels" de différentes hauteurs. La profondeur de champ correspondrait à la hauteur maximale pour laquelle en faisant la mise au point sur la partie supérieure, le fond est toujours net (Figure[8c]).

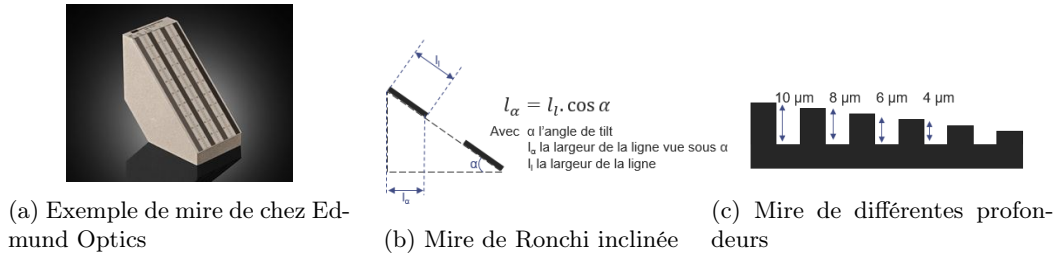


FIGURE 8 – Quelques méthodes de mesures de la profondeur de champ

## 5.2 Mesures

- Luminance :  $5.10^{-3}$  à  $10^6 \text{ cd/m}^2$  avec une précision meilleure que  $\pm 3\%$   $\Rightarrow$   
La valeur minimale est la plus simple à vérifier ici. Le spectro-imageur est livré avec 3 densités optiques (OD0, OD2 et OD4). Nous avons également en notre possession quelques sources lumineuses dont les luminances ont été calibrées pour une ou plusieurs tensions d'alimentation. Il suffit alors tout simplement d'utiliser la densité la plus forte (OD4 soit une atténuation de 10 000) sur une source émettant environ  $50 \text{ cd/m}^2$ . Concernant la valeur maximale, nous arrivons, au LITE, à fabriquer des sources microLEDs émettant jusqu'à  $10^6 \text{ cd/m}^2$ .  
Pour étudier l'homogénéité de la luminance dans le champ de la caméra, il suffirait de masquer une source (par exemple un backlight) avec une ouverture suffisamment petite puis de faire plusieurs mesures en déplaçant l'ensemble source-masque (et non pas seulement le masque qui inclurait la possible inhomogénéité spatiale de la source). Ainsi, à chaque mesure, une nouvelle zone du champ de la caméra est sollicitée. En comparant les différentes valeurs mesurées, nous pourrions ainsi étudier l'homogénéité du champ de la caméra.  
Quant à la précision de la mesure de la luminance, il suffit de faire plusieurs mesures successives à la même position.
- Colorimétrie : Précision d'au moins 0,003 sur les coordonnées colorimétriques  $x, y \Rightarrow$

La méthode pour vérifier cette précision est la suivante : à l'aide d'une source calibrée, nous effectuons plusieurs mesures successives puis nous vérifions l'écart-type des valeurs de coordonnées de chromaticité obtenues. Ces mesures sont faites sur plusieurs couleurs : blanc, rouge, vert, bleu afin de vérifier l'homogénéité également. Nous avons à notre disposition un backlight de chez Effilux. Grâce à sa courbe d'homogénéité ( $>90\%$ ), nous savons qu'il faudrait éviter de bouger la source entre deux mesures. L'idéal serait également de vérifier en amont que la mesure de la valeur de luminance de la source ne change pas entre deux mesures. Pour cela, nous pourrions étudier l'évolution temporelle de la luminance de la source grâce à un luminancemètre.

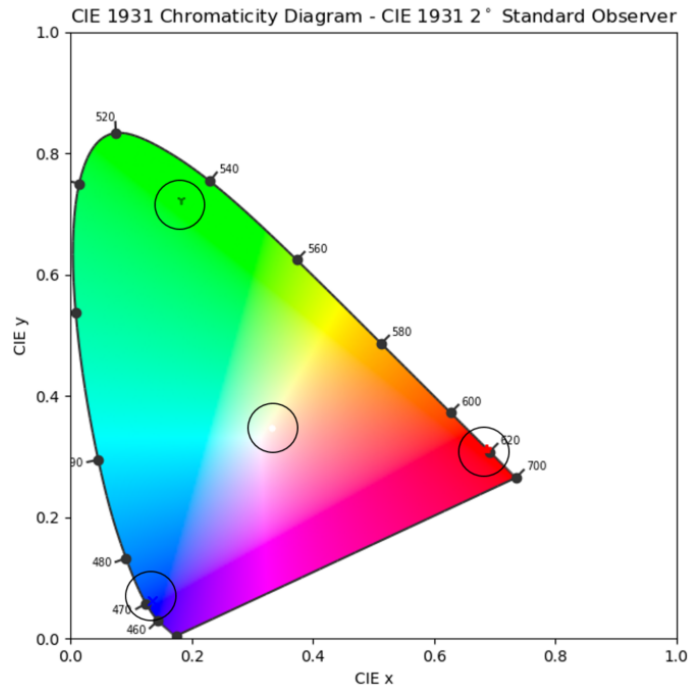
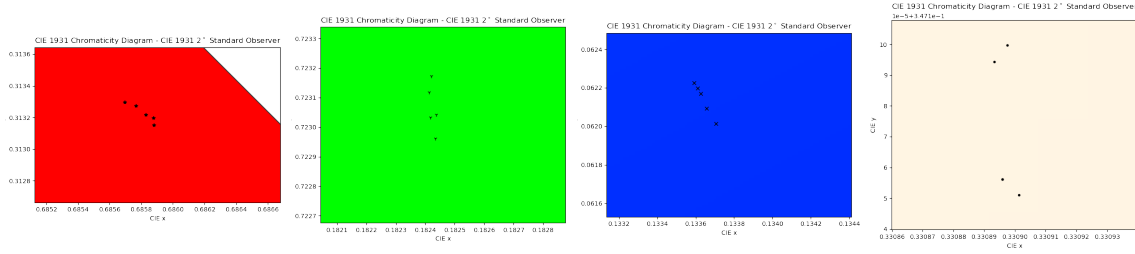


FIGURE 9 – Diagramme de chromaticité du spectro-imageur



(a) Rouge 625 nm

(b) Vert 525 nm

(c) Bleu 465 nm

(d) Blanc

FIGURE 10 – Zoom sur les points obtenus

Couleur	Moyenne (x)	Écart-type (x)	Moyenne (y)	Écart-type (y)
Blanc	0,331	$2,926.10^{-6}$	0,347	$2,349.10^{-5}$
Vert	0,182	$1,097.10^{-5}$	0,723	$8,123.10^{-5}$
Rouge	0,683	$7,865.10^{-5}$	0,313	$5,820.10^{-5}$
Bleu	0,134	$4,472.10^{-5}$	0,062	$8,595.10^{-5}$

TABLE 1 – Moyennes et écarts-types des coordonnées x et y pour chaque couleur

Le tableau [1] résume les résultats obtenus sur 5 mesures pour chaque backlight. La précision demandée est donc largement obtenue :  $4,827.10^{-5}$  en moyenne au lieu des 0,003 demandé, soit  $100 \times$  plus précis.

Sur le diagramme de chromaticité Figure [9], nous pouvons d'ailleurs relever que la pureté d'excitation est très proche des 100 % pour le rouge et le bleu. Nous pouvons également noter que les longueurs d'ondes sont justes à 5 – 10 nm près. Cela sera approfondi avec les mesures de résolution en spectroscopie (point suivant).

- Spectroscopie : Précision de 2 nm sur la mesure du spectre entre 400 et 800 nm  $\Rightarrow$  Gamme du spectre entre 380 et 720 nm : nous nous limitons finalement à la gamme du visible donc cette partie du critère est validée.  
Quant à la résolution spectrale, l'idée ici est d'utiliser une lampe à vapeur de sodium puisque cette dernière présente un spectre avec des raies très fines et parfaitement définies. Encore une fois, en faisant plusieurs mesures du spectre, nous pourrions vérifier la répétabilité et la précision du spectromètre.

### 5.3 Exemples d'images obtenues

Dans cette partie, je présente quelques exemples d'images obtenues sur des champs de micro-LEDs. L'image présentée en Figure [11] provient d'une matrice de  $330 \times 185$  pixels ayant une dimension de  $10 \mu\text{m}$  chacun et dessinant un vaisseau spatial :

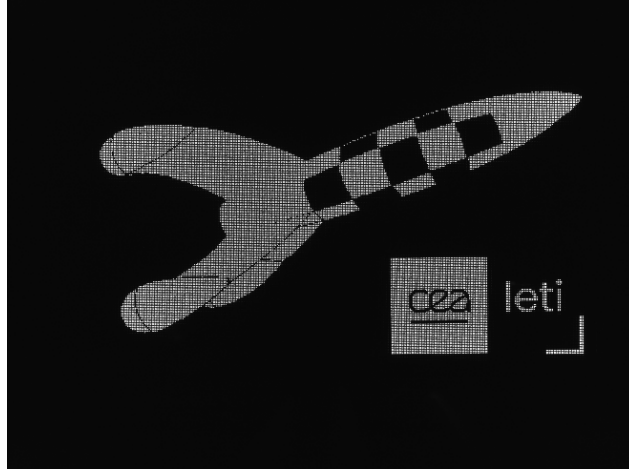


FIGURE 11 – Image brute obtenue avec le spectro-imageur

Sur l'image [12], chaque pixel représente une microLED de la plaque étudiée dont l'intensité est ramenée sur une dynamique de 12-bit (entre 0 et 4095). Le logiciel a également automatiquement détourné les bords de l'écran. L'image obtenue est nommée une map. Le spectromètre effectue également une mesure sur un diamètre de 1 mm au centre de l'écran : cela permet ensuite d'avoir la valeur de la luminance pour chaque pixel du spectro-imageur. Le software présente plusieurs fonctions, dont une qui permet de détourner tous les pixels défectueux (trop ou pas assez brillants par exemple) sur la base de certains paramètres et seuils qui déterminent la sensibilité de la détection.

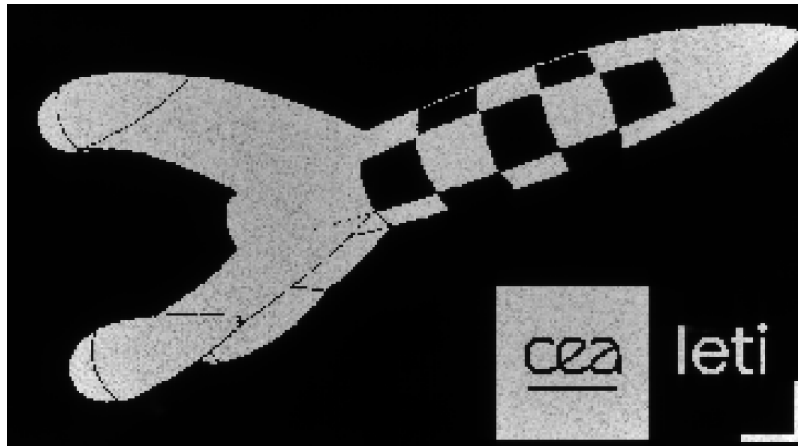


FIGURE 12 – La même image traitée avec le software

Sur la photographie [13], les  $330 \times 185$  pixels sont tous censés être allumés. Nous remarquons plusieurs défauts macroscopiques sur un nombre conséquent d'entre eux, probablement dû à la méthode de fabrication. Dorénavant, le spectro-imageur permettra de faciliter l'étude de ces défauts.

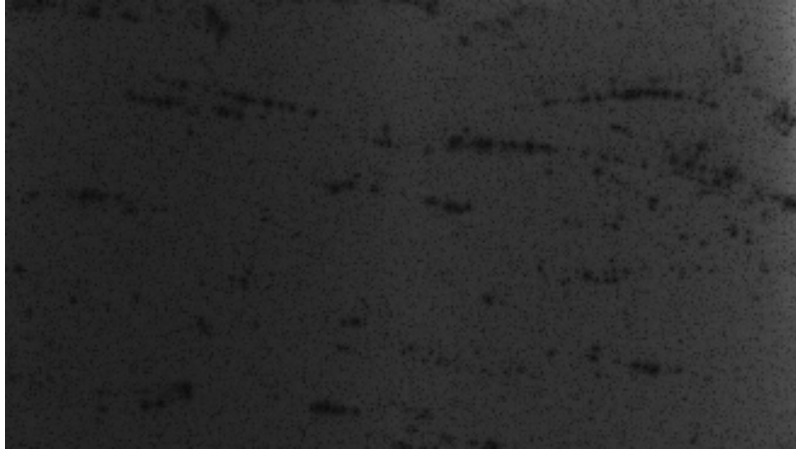


FIGURE 13 – Autre exemple de map

## Compétences à valider

Lors du bilan en entreprise il y a six mois, quelques points ont été définis pour valider ou non l'évaluation de cette année en entreprise. Ils sont au nombre de trois et ce rapport permet d'établir comment je considère avoir validé ces points :

- Compétence scientifique : définir, évaluer et justifier la précision d'un instrument de mesure complexe  $\Rightarrow$  Toute la partie [5] est basée sur le premier point : les compétences scientifiques. Même si le retard à la livraison de l'équipement ne m'a pas permis de valider l'entièreté des spécifications, j'ai noté des idées de tests à mener pour les spécifications restant à valider.
- Compétence pratique : utiliser et piloter un nouvel équipement : le spectro-imageur  $\Rightarrow$  J'avais déjà commencé à travailler en amont sur la partie pilotage du spectro-imageur et à la date d'écriture de ce rapport toutes les fonctions bas niveau ont déjà été traduites. Il est donc pilotable par Python et je peux passer à l'écriture de fonctions de pilotage plus haut niveau pour faciliter l'automatisation.
- Compétence professionnelle : faire une présentation orale du travail accompli avec support ppt.  $\Rightarrow$  Enfin, le dernier point fait surtout référence à la présentation que je compte faire lors de la visite de mon tuteur en école dans les laboratoires du LITE. La présentation orale sera suivie d'une démonstration des compétences scientifiques et professionnelles acquises. En outre, des présentations faites au sein du laboratoire m'ont permis de travailler cette compétence.

## Perspectives

Les prochaines étapes pour cette dernière année en alternance consistent à :

- Finir les évaluations des spécifications du spectro-imageur. Il s'agit notamment de la mesure de la profondeur de champ, la précision sur la mesure de la longueur d'onde, refaire d'autres

mesures de la MTF, vérifier la détection d'un pixel éteint entouré de pixels allumés, vérifier la taille du plus petit composant mesurable.

- Travailler sur l'automatisation des mesures en utilisant les mêmes fonctions que le software fourni par ELDIM. Je dois dans un premier temps identifier tous les paramètres utiles au bon fonctionnement des fonctions dans le but de les simplifier au maximum. Par exemple, au moment de l'écriture de ce document, j'ai écrit un code Python qui se base sur un fichier Excel de l'utilisateur pour rédiger toutes les recettes .XML utilisées par le software. Il faudra ensuite réussir à tout intégrer dans l'environnement d'automatisation déjà existant au LITE.

## Bibliographie

- **Characterization of GaN-on-Si micro LEDs matrix using a new ultra wide field of view imaging photometer resolving micro LED pixel size down to  $2,5\mu\text{m}$** ; Patrick Le Maitre (1), Xavier Leboeuf (1), Aurélien Lardeau-Falcy (1), Clément Ballot (1), Talla Diagne (1), Julia Simon (1), Paolo De Martino (1), Thibault Bignon (2), Maëlig Bacci (2), Mathieu Luet (2), Thierry Leroux (2)  
(1) CEA-LETI, 17 Rue Des Martyrs, 38054 Grenoble, France  
(2) ELDIM, 1333 Rue d'Epron, 14200 Hérouville-Saint-Clair, France
- **Etude des caractéristiques électro-optiques de micro-LED GaN pour application aux micro-écrans haute-luminance.** François Olivier. Micro et nanotechnologies/Micro-électronique. Université Grenoble Alpes, 2018. Français. NNT :2018GREAT019. tel-01868252
- **CII. Luminous carborundum detector and detection effect and oscillations with crystals.** Oleg Lossev (1928). The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 6(39), 1024–1044.