

Mise au point par Ray Tracing d'un système  
de visualisation de circuit imprimé:

Michel Fabrice  
*2<sup>ieme</sup>* Licence en sciences physiques  
Université de Liège.

Année académique 2003-2004.

# Table des matières

# Chapitre 1

## Introduction :

Ce rapport a été réalisé dans le cadre du cours d'*Optique appliquée* donné par Monsieur C. Jamar, directeur général du *Centre Spatial de Liège*.

Le but de ce travail est de nous familiariser avec le logiciel de Ray Tracing, Code V.

Pour ce faire, nous tenterons de mettre au point un système opto-électronique permettant de monitorer la fabrication de circuits imprimés dans une chaîne de montage.

Nous essayerons d'être le plus réaliste possible quant aux choix du détecteur CCD, des matériaux utilisés,...

# Chapitre 2

## Problème à résoudre :

Reprenons dans ce chapitre l'énoncé du problème tel qu'il nous a été communiqué.

### 2.1 Objet :

Il s'agit de monitorer la fabrication de circuits imprimés dans une chaîne de montage. Les circuits imprimés défilent sur une bande porteuse et vous devez imaginer un système de visualisation relié à une caméra.

### 2.2 Travail :

Vous devez décrire succinctement votre système de visualisation en prenant en compte tous les éléments :

- système de déclenchement ;
- illumination ;
- système optique ;
- système d'acquisition.

Vous devez décrire précisément votre système optique ainsi que ses performances.

### 2.3 Spécifications :

Dans chaque acquisition, les éléments doivent avoir un contraste meilleur que 0.2.

## 2.4 Données :

### 2.4.1 Circuits imprimés :

Taille : 200 x 200  $mm^2$

Distance entre lignes : 0.6mm

Lumière parasite : le circuit est supposé lambertien (TIS  $\approx$  30% uniforme dans le domaine spectral considéré)

### 2.4.2 Illumination :

Lampe standard à filament

### 2.4.3 Optique :

Domaine spectral : 400nm - 600nm

Les surfaces optiques sont coatées anti-reflet (T  $\approx$  98% dans le domaine spectral considéré)

Système limité à 3 lentilles

### 2.4.4 Détecteur :

CCD standard avec un QE de 60%.

Le bruit s'élève à 10 électrons. On veut un rapport signal/bruit supérieur à 100.

## 2.5 Questions :

Voici quelques questions qui peuvent vous aider.

- 1 Quelle est la taille nécessaire de la pupille d'entrée du système optique ?
- 2 Quel est le grandissement du système optique, sa longueur focale ?
- 3 Quelle est la taille du détecteur, le nombre de pixels ?
- 4 Quelles sont les performances optiques attendues au centre du champ et au bord du champ ? Quelle est l'influence d'un défocus ?
- 5 Quelle est la tolérance admissible en positionnement du circuit imprimé ?

# Chapitre 3

## Caractérisations optiques du système :

Avant de nous lancer dans la conception numérique du système optique, déterminons analytiquement les grandeurs essentielles du dispositif : grandissement linéaire, distances focales,...

### 3.1 Géométrie du problème :

Nous supposons que le détecteur CCD est situé 1 mètre au dessus de la bande porteuse. Ainsi, si besoin est, les techniciens auront toujours la possibilité de venir travailler sur le circuit imprimé qui est monitorer.

Quant aux circuits imprimés, considérons qu'ils ne font pas 200mm de côté mais bien 210mm. Nous aurons dès lors une plus grande tolérance quant à la précision de la position des objets sur la bande porteuse.

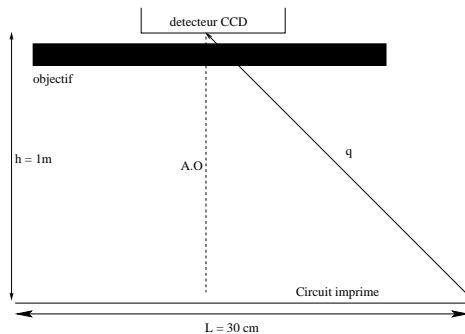


FIG. 3.1 – Représentation, non à l'échelle, de la géométrie du problème.

Nous travaillerons avec un détecteur CCD de 1024 x 1024 pixels ( $24\mu m$ ). Cette caméra doit évidemment avoir une sensibilité maximale dans la gamme des longueurs d'onde de l'illumination utilisée.

Dans notre cas, la lampe à filament génère des longueurs d'ondes dans l'intervalle<sup>1</sup> [400 ; 600] nm.

### 3.2 Grandissement linéaire du système :

Nous devons visionner des lignes distantes de 0.6mm sur une plaque de 21 x 21  $cm^2$ .

Dès lors, il faut qu'une longueur de 0.3mm sur le circuit soit retrouvée dans un pixel de  $24\mu m$  du CCD. On doit donc avoir un grandissement linéaire  $G_l = \frac{24 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-4}} = 8 \cdot 10^{-2}$ .

Connaissant le grandissement linéaire du dispositif et la distance maximale<sup>2</sup> q entre le circuit imprimé et la caméra CCD, nous pouvons en déduire la distance focale f du système optique par la relation :

$$G_l = \frac{f}{q} \quad (3.1)$$

On trouve que le dispositif optique doit posséder une distance focale f (en module) de l'ordre de  $8 \cdot 10^{-2}m$ .

Nous avons déterminé le grandissement linéaire et la distance focale du système en nous basant sur la résolution minimale exigée. Cependant, vérifions maintenant que l'image du circuit imprimé apparaîtra dans son entièreté sur l'écran à la caméra CCD.

Nous possédons un détecteur de dimension 1024 x 1024 pixels ( $24\mu m$ ). Ceci correspond donc à un carré de 24.576 mm de côté.

Quant à l'image du circuit imprimé, elle sera carrée de côté 210.  $G_l = 16.8mm$ . On constate donc que tout le circuit imprimé apparaîtra à l'écran.

---

<sup>1</sup>En pratique, le spectre d'émission de la lampe est discret mais ceci ne nous inquiète guère.

<sup>2</sup>Par Pythagore,  $q = \sqrt{h^2 + (L/2)^2} = 1.044 \approx 1m$ . Avec les conventions de signe de l'optique géométrique, q doit être négatif :  $q = -1m$ .

# Chapitre 4

## Caractérisations photométriques du système :

Dans ce chapitre, étudions les exigences photométriques de la caméra CCD. Ceci dans le seul but de déterminer le diamètre de notre objectif.

### 4.1 Etude du bruit et éclairage minimum des pixels CCD :

Analysons, dans cette section, le bruit de notre détecteur.

Chaque pixel CCD possède un bruit électronique  $B_e$  s'élevant à 10 électrons. Or le détecteur possède un rendement quantique QE de 60%. Du coup, au bruit électronique, on peut associer un bruit photonique  $B_{ph}$ , par définition du rendement quantique, de  $100/6$  photons.

De plus, on veut un rapport signal sur bruit de l'ordre de 100. Ce qui signifie, en vertu de  $B_{ph}$ , que le rayonnement lumineux atteignant chaque pixel CCD doit contenir  $10^4/6$  photons.

Chaque photon possédant une énergie  $hc/\lambda$ , le signal photonique doit avoir une énergie totale minimale de  $\frac{10^4 hc}{6\lambda_{max}}$ .

Où  $\lambda_{max}$  est la longueur maximale détectée par la caméra. Notre lampe à filament émet une longueur d'onde maximale de 600nm.

Ceci amène donc que chaque pixel doit détecter une énergie minimale de  $0.5521 \times 10^{-15} J$ .

En supposant que le CCD possède un temps d'acquisition  $T$  de l'ordre du millième de seconde, on déduit que le flux lumineux minimum  $\phi_{min}$  a détecté est de l'ordre de  $0.5521 \times 10^{-12}W$ .

Finalement, le pixel doit posséder un éclairage minimum  $E'_{min}$  :

$$E'_{min} = \frac{\phi_{min}}{S_{pixel}} \approx \frac{1/2 \cdot 10^{-15}}{(24 \cdot 10^{-6})^2} \approx 8.68 \cdot 10^{-4} W m^{-2} \quad (4.1)$$

$S_{pixel}$  étant la surface du pixel.

## 4.2 Luminance du circuit imprimé :

Le circuit imprimé est éclairé par une lampe standard à filament.

Lorsque l'on se situe à un mètre d'une telle lampe, on perçoit un éclairage, dans le visible, de l'ordre de  $2.2 W m^{-2}$ .

Dès lors, si l'on place le circuit imprimé à un mètre de la lampe, il percevra celle-ci comme une source d'excitance  $M_L$  de l'ordre de  $2.2 W m^{-2}$ .

Le circuit possédant un facteur de réflexion de 30%, il apparaîtra, pour le détecteur, comme une source lumineuse d'excitance  $M_C = \frac{30}{100} M_L = 0.66 W m^{-2}$ .

Le circuit étant lambertien, on en déduit de suite sa luminance  $L_C$  par la loi de Lambert :

$$L_C = \frac{M_C}{\pi} \approx 0.21 W m^{-2} \quad (4.2)$$

Chaque dioptré possédant un facteur de transmission de 98%, la luminance du circuit vaut finalement, dans le cas de 3 dioptrés<sup>1</sup>  $0.19 W m^{-2}$ .

## 4.3 Taille de l'objectif :

Connaissant l'éclairage minimum que les pixels doivent percevoir pour différencier le signal lumineux du bruit et sachant la valeur de la luminance

---

<sup>1</sup>Cas d'un système optique composé de deux lentilles accolées.

du circuit imprimé, nous pouvons déduire la taille minimum de notre objectif par la relation :

$$E'_{min} = (1 - \epsilon)L_C\omega G_l^{-1} \quad (4.3)$$

Où  $\epsilon$  est un coefficient d'atténuation que nous négligerons;  $\omega$  est relié au diamètre de l'objectif  $D$  et à la distance  $q$  circuit-objectif par la relation :  $\omega = \pi \left(\frac{D/2}{q}\right)^2$ .

Finalement, le diamètre minimum de notre objectif vaut :

$$D = \sqrt{\frac{E'_{min}G_l}{L_C\pi}}2q \approx 6.69mm \quad (4.4)$$

## 4.4 Diffraction aux bords de l'objectif :

Dans cette section, étudions la diffraction aux bords de notre objectif afin de savoir si notre diamètre  $D$  déterminé ci-dessus convient.

La diffraction exige que notre objectif possède un diamètre minimum  $D_{min}$  déterminé par la relation de Airy :

$$D_{min} = 1.22 \frac{\lambda_{max}}{\theta} \quad (4.5)$$

Où  $\theta$  est le rapport entre la résolution souhaitée sur la distance  $q$ . C'est à dire :  $\theta = (3.10^{-4}/1) = 3.10^{-4}rad$ .

$\lambda_{max}$  est la longueur d'onde maximale que l'objectif doit percevoir. Dans notre cas,  $\lambda = 6.10^{-7}m$ .

Finalement, la relation ?? indique que l'objectif doit posséder un diamètre minimum de 2.44 mm afin d'éviter des problèmes diffractifs.

Notre objectif ayant un diamètre de 6.69mm, la diffraction ne jouera pas un rôle primordial dans notre système.

## 4.5 Champ du système :

Connaissant le diamètre de l'objectif, nous pouvons déduire le champ  $2\alpha$  du système.

Celui-ci est défini par la relation<sup>2</sup> suivante :

$$\tan(\alpha) = \frac{(L/2) - (D/2)}{q} \quad (4.6)$$

Pour un objet de longueur L valant 210mm placé à 900mm du diaphragme et pour un stop de 6.69mm de diamètre D,  $\alpha$  vaut un angle approximatif de 6.441° .

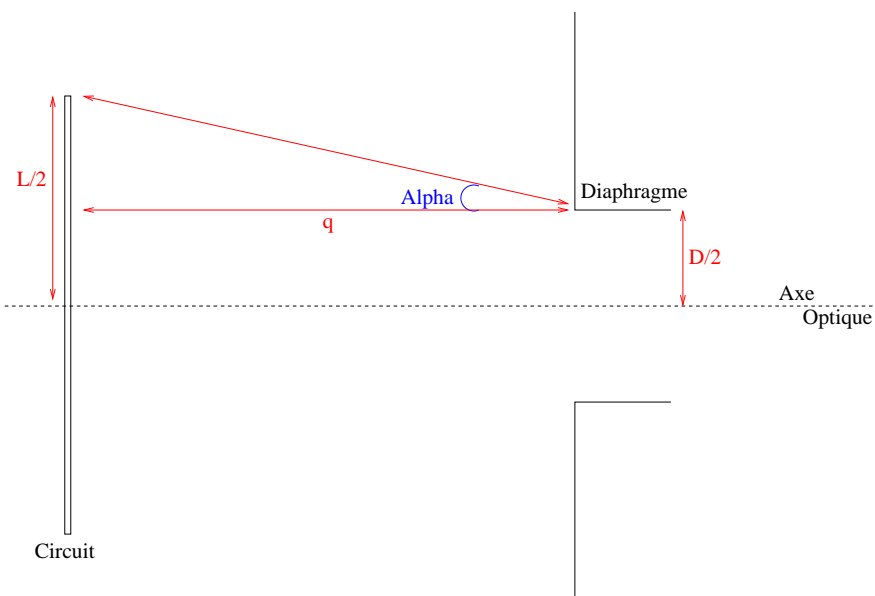


FIG. 4.1 – Base de la détermination trigonométrique du champ du système.

---

<sup>2</sup>En vertu de la figure ??

# Chapitre 5

## Construction et optimisation des composants optiques :

Dans le chapitre précédent, nous avons déterminé analytiquement les caractéristiques que notre système optique doit posséder. Dès lors, il nous est possible d'utiliser le logiciel Code V.

Reprenons nos meilleurs résultats obtenus après optimisation du programme.

### 5.1 Initialisation du logiciel :

Pour mettre au point notre objectif, nous avons défini la pupille d'entrée, les longueurs d'onde de travail et le champ du système.

Notre pupille d'entrée est définie par un diaphragme placé devant le jeu de lentilles. Ce "*stop*" est vu comme une ouverture circulaire de 6.69mm de diamètre afin de tenir compte des exigences photométriques.

Les longueurs d'onde de travail sont 400nm, 500nm et 600nm en accord avec l'énoncé.

Pour tenir compte du champ, on travaille avec trois séries de rayons lumineux d'inclinaison, par rapport à l'axe optique, différente. La première série correspond à des rayons de champ nul (inclinaison nulle). La deuxième série équivaut à une inclinaison de  $3.31^\circ$ . Quant à la dernière série, l'inclinaison a la valeur de  $6.441^\circ$  (en accord avec la section ??).

## 5.2 Création du système optique :

Une fois le logiciel "initialisé", on définit<sup>1</sup> la composition du système optique :

- un objet : notre circuit imprimé ;
- un stop : diaphragme ;
- $S_1$  : interface d'entrée de notre première lentille  $L_1$  ;
- $S_2$  : interface de sortie de  $L_1$  et d'entrée d'une deuxième lentille <sup>2</sup> ;
- $S_3$  : interface de sortie de  $L_2$  ;
- une image : notre détecteur CCD.

Toutes les surfaces sont définies comme étant sphériques et non-réfléchissantes<sup>3</sup>. L'objet, le stop et l'image étant planes, leur rayon de courbure (selon l'axe Y) est posé comme infini. L'objet est supposé être à (moins) l'infini.

## 5.3 Optimisation :

Maintenant que nous possédons l'architecture globale du système, optimisons le afin d'obtenir des spots lumineux de dimension inférieure à celle des pixels ( $24\mu m$ ) du CCD.

Pour ce faire, on impose<sup>4</sup> au programme que le système doit posséder un grandissement linéaire maximum de 0.08.

Par contre, on permet au logiciel de faire varier :

- la position du diaphragme par rapport à la surface  $S_1$  ;
- les matériaux constituant les différentes lentilles ;
- les rayons de courbures des surfaces  $S_1$  et  $S_2$  ;
- les épaisseurs des lentilles  $L_1$  et  $L_2$ .

On analysera les résultats de cette optimisation pour savoir si le système conçu est apte à répondre à nos exigences.

---

<sup>1</sup>*Lens Data Manager*

<sup>2</sup>Les lentilles  $L_1$  et  $L_2$  sont donc accolées.

<sup>3</sup>*Refract Mode*

<sup>4</sup>Dans *Automatic Design/Specific Constraints/Optical Definitions*, *Reductio Ratio* < 0.08.

**N.B** : lancer plusieurs fois l'optimisation permet d'améliorer les résultats.

### 5.3.1 Analyse, par *Quick Spot*, de l'optimisation :

Les séries de rayons lumineux de champ nul, d'inclinaison "moyenne" de  $3.31^\circ$  et de champ maximal ( $6.441^\circ$ ) produisent chacune un spot lumineux de taille respective de  $4.04\mu m$ ,  $7.18\mu m$  et de  $21.81\mu m$  de diamètre.

L'étude de la dimension des spots conduit donc à la conclusion que le système optique est acceptable car toutes ces taches lumineuses rentrent dans un seul pixel de notre détecteur CCD ( $24\mu m$ ).

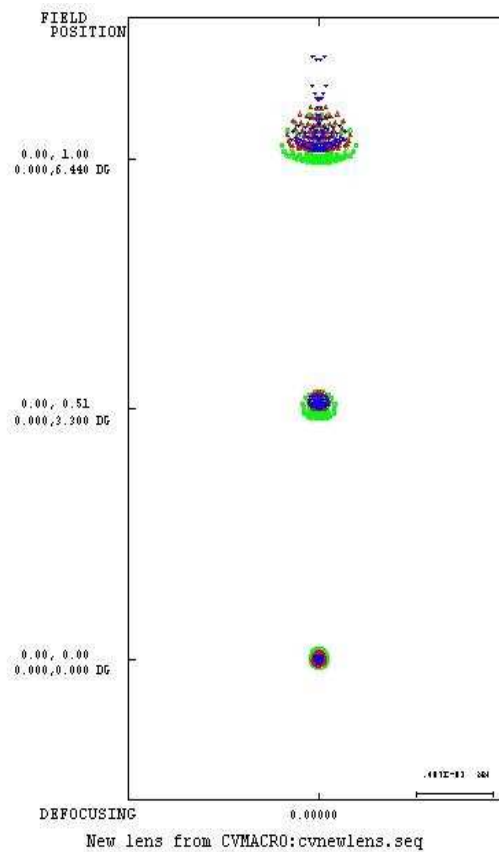


FIG. 5.1 – Représentation des spots lumineux pour les différentes inclinaisons. *De haut en bas* : inclinaison de  $6.441^\circ$ ,  $3.31^\circ$  et nulle. En rouge :  $\lambda = 600nm$  ; en vert :  $\lambda = 500nm$  ; en bleu :  $\lambda = 400$ .

### 5.3.2 Analyse des aberrations chromatiques :

Dans la figure ??, on constate que notre système optique est peu sensible aux aberrations chromatiques.

En effet, aussi bien dans les composantes tangentielle que sagittales, et quelle que soit l'inclinaison des rayons lumineux, nous observons que les courbes (rouge, verte et bleue) relatives aux différentes longueurs d'onde de travail sont très proches<sup>5</sup>.

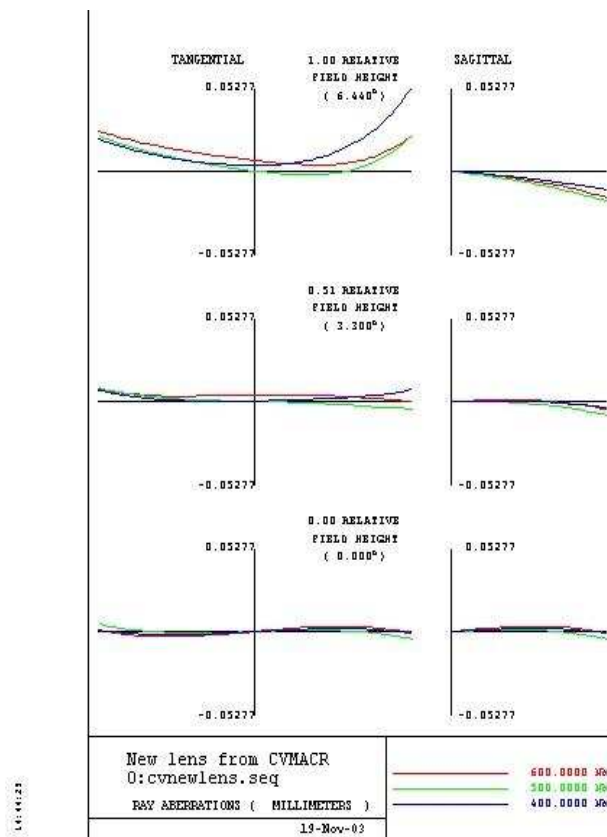


FIG. 5.2 – Représentation des composantes tangentielle et sagittales des aberrations chromatiques. *En rouge* :  $\lambda = 600\text{nm}$ . *En vert* :  $\lambda = 500\text{nm}$ . *En bleu* :  $\lambda = 400$ . *De haut en bas* : inclinaison de  $6.441^\circ$ ,  $3.31^\circ$  et nulle.

<sup>5</sup>L'écart entre les différentes longueurs d'onde est d'autant plus insignifiant que l'échelle de l'axe vertical y est petite.

### 5.3.3 Analyse de la distorsion et de l'astigmatisme :

Le figure ?? montre que l'astigmatisme et que la distorsion sont faibles dans notre système.

En effet, pour l'astigmatisme, les composantes tangentielle et sagittale sont quasi-confondues.

Quant à la distorsion, due à la présence de notre "stop", elle n'est au maximum que de l'ordre du pourcent.

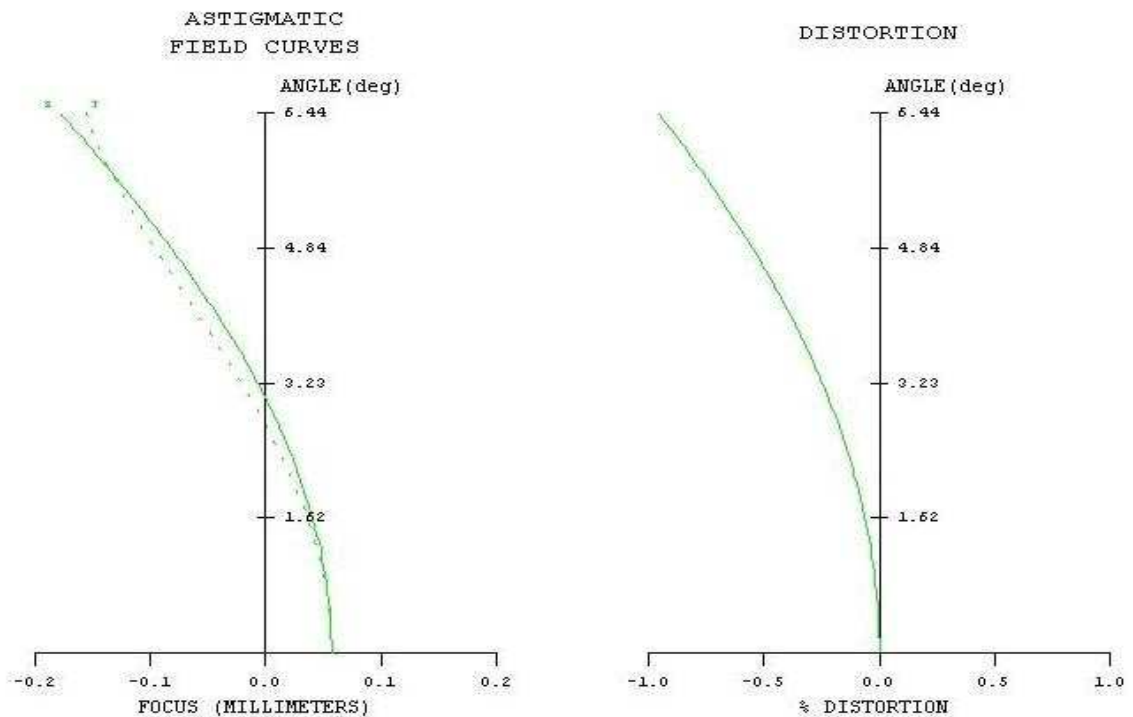


FIG. 5.3 – A gauche : étude de l'astigmatisme. A droite : étude de la distorsion.

### 5.3.4 Conclusion :

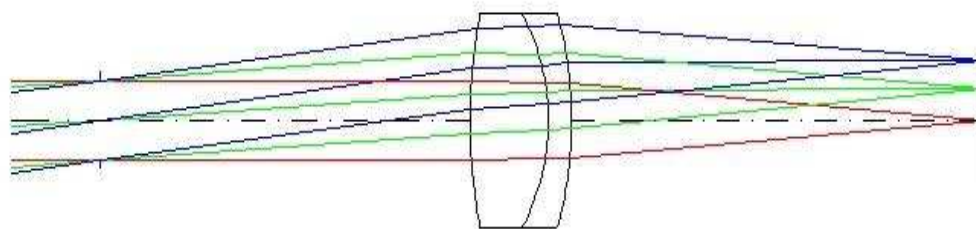
Les différentes analyses faites ci-dessus nous permettent d'accepter le système calculé par le logiciel. Ce dispositif final est repris en détails dans la section *Résultats* suivante.

## 5.4 Résultats :

Notre système optique se présentera sous la forme décrite dans le schéma ??.

Les caractéristiques des différentes surfaces sont :

<i>Surface</i>	<i>Surface Type</i>	<i>Y Radius</i>	<i>Thickness</i>	<i>Glass</i>	<i>Refract Mode</i>
Objet	Sphere	Infinity	Infinity		Refract
Stop	Sphere	Infinity	37.8953		Refract
$S_1$	Sphere	40.1975	8.0000	487490.70	Refract
$S_2$	Sphere	-16.0578	2.3583	717050.35	Refract
$S_3$	Sphere	-28.7677	42.2253		Refract
Image	Sphere	Infinity	0.0234		Refract



Error function = 6.33350974

Scale: 2.10

19-Nov-03

FIG. 5.4 – Représentation schématique de notre système optimisé

# Chapitre 6

## Systemes de déclenchement et d'acquisition :

Jusqu'à présent, nous n'avons décrit que le dispositif optique qui sert à visualiser les circuits imprimés. Cependant, dans un système de monitoring, il faut associer à cette optique de l'électronique.

Le but de ce chapitre sera de décrire brièvement l'électronique annexée au détecteur CCD.

### 6.1 Système d'acquisition :

Le but du système d'acquisition est relier le détecteur CCD à un ordinateur afin d'obtenir l'image du circuit imprimé sur un écran.

Pour ce faire, le dispositif d'acquisition doit contenir au minimum :

- l'objectif et le détecteur CCD ;
- système de balayage du CCD ;
- un préampli ;
- un amplificateur ;
- un convertisseur analogique-digital ;
- un ordinateur avec une interface graphique adéquate.

Le système de balayage a pour rôle de parcourir pixel par pixel (et de manière organisée) le détecteur CCD. A chacun de ces pixels, correspondra un signal électrique d'amplitude  $I_i$  ;  $i = 1, 2, \dots, 1024 \times 1024$ .

Les impulsions électriques  $I_i$  seront amplifiées "linéairement" par le préampli et l'amplificateur.

Ensuite le convertisseur transformera la suite de signaux électriques en une suite de nombres  $E_i$ . Les différents  $E_i$  étant proportionnels aux amplitudes des  $I_i$ .

La suite des nombres  $E_i$  pourra être traitée par l'ordinateur. Un programme adéquat permettra de convertir la suite de nombres  $E_i$  en une matrice  $1024 \times 1024$ . L'élément  $(m,n)$  de cette matrice correspondra au pixel CCD de coordonnées  $(m,n)$ .

Le valeur de l'élément matriciel  $(m,n)$  étant proportionnel à l'éclairement du pixel CCD  $(m,n)$ , il est possible de reconstruire l'image du circuit imprimé sur un moniteur.

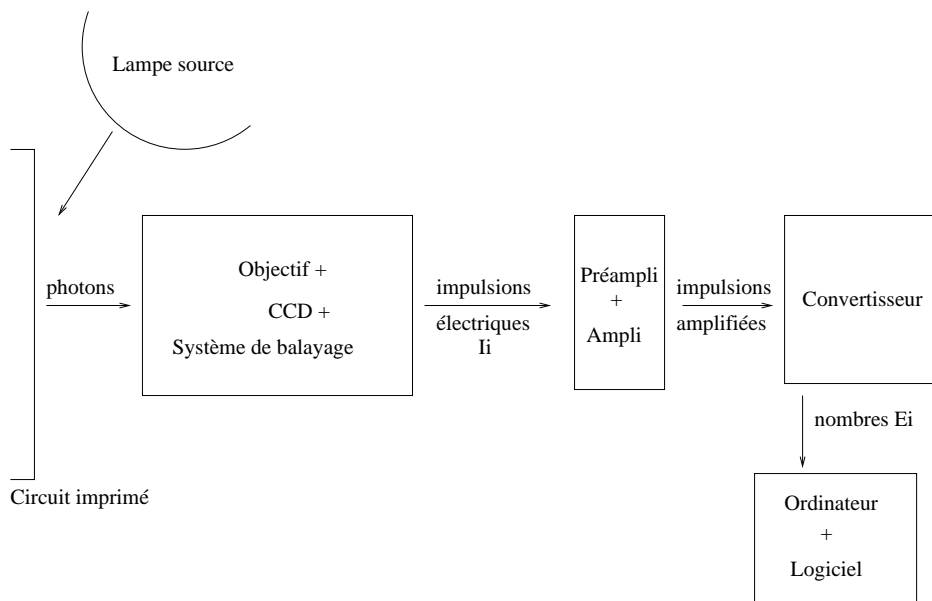


FIG. 6.1 – Représentation schématique du système d'acquisition.

## 6.2 Système de déclenchement :

Le système de déclenchement permet de signaler au dispositif d'acquisition le moment où il faut actualiser l'image sur le moniteur. C'est à dire, lui

signaler l'arrivée d'un nouveau circuit imprimé sous la caméra CCD.

Pour ce faire, plaçons d'un côté de la bande porteuse une diode laser et de l'autre, un détecteur (une photodiode par exemple). Le faisceau laser doit tomber, après réflexion sur un circuit imprimé, sur le détecteur.

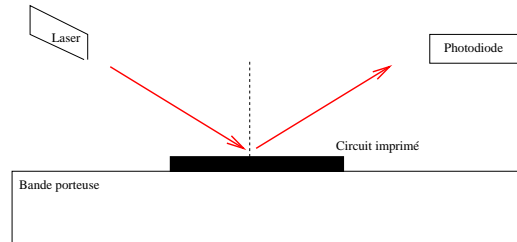


FIG. 6.2 – Représentation schématique du système de déclenchement.

En calibrant<sup>1</sup> ce dispositif, il est possible de définir deux états pour la photodiode : 0 (pas de circuits imprimés sous le CCD :  $V_{detecte} \leq V_{seuil}$ ) et 1 (présence d'un circuit imprimé :  $V_{detecte} > V_{seuil}$ ).

Lorsque la photodiode passera d'un état 0 à un état 1, on lancera une nouvelle acquisition.

Le circuit électronique qui réalise une telle opération est le Trigger de Schmitt : figure ??.

L'amplificateur opérationnel envoie un signal au CCD lorsque la tension provenant de la photodiode est supérieure à la tension  $V_{seuil}$ . Quant à la résistance R, elle permet d'éviter des problèmes dits de *déclenchements multiples* : elle introduit un niveau d'hystérésis dans le montage.

Lorsque la caméra CCD percevra un signal, elle lancera une nouvelle acquisition.

---

<sup>1</sup>C'est à dire, définir une tension  $V_{seuil}$  qui correspond au signal électrique à la sortie de la photodiode en l'absence de circuits imprimés : c'est la tension relative au bruit.

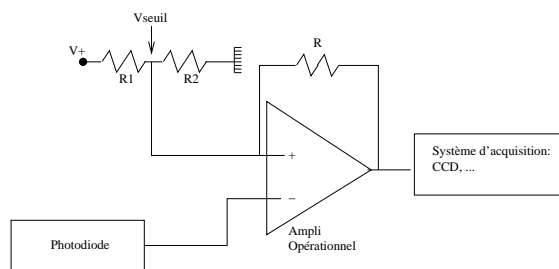


FIG. 6.3 – Electronique reliant les systèmes de déclenchement et d'acquisition : Trigger de Schmitt.

### 6.3 Conclusion :

L'étude du système optoélectronique nécessaire à la visualisation de circuits imprimés étant terminée, il *"ne reste plus qu'à"* passer à la fabrication et à la mise en place, dans la chaîne de montage, des différents éléments.

# Bibliographie

- [1] J.Ph. PEREZ. *Optique, fondements et applications*. 6<sup>ième</sup> édition, Dunod, 2000.
  - [2] American Institute of Physics. *Handbook of applied photometry*. Ed. Casimer DeCusatis, Aip Press, 1998.
  - [3] Y. RENOTTE. *Optique cohérente et incohérente*. Cours de 2<sup>ième</sup> licence en sciences physiques, Université de Liège, Belgique, Année académique 2002-2003.
  - [4] C. JAMAR. *Optique appliquée*. Cours de 2<sup>ième</sup> licence en sciences physiques, Université de Liège, Belgique, Année académique 2003-2004.
  - [5] HP. GARNIR. *Electronique et traitement des données*. Cours de 1<sup>ère</sup> licence en sciences physiques, Université de Liège, Belgique, Année académique 2001-2002.
-