

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**CARACTÉRISATION D'UNE MATRICE DE PIXELS CONÇUE
POUR CAPTEURS D'IMAGES
COULEURS SANS FILTRE OPTIQUE**

PASCAL BURASA

**DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
DÉCEMBRE 2008**



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*
ISBN: 978-0-494-48909-3
Our file *Notre référence*
ISBN: 978-0-494-48909-3

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

■*■
Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

**CARACTÉRISATION D'UNE MATRICE DE PIXELS CONÇUE
POUR CAPTEURS D'IMAGES
COULEURS SANS FILTRE OPTIQUE**

Présenté par : **BURASA Pascal**

En vue de l'obtention du diplôme de : **Maîtrise ès sciences appliquées**

A été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. DAVID Jean-Pierre, Ph.D., président

M. AUDET Yves, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. BRAULT Jean-Jules, Ph.D., membre

Remerciements

Ma reconnaissance va en tout premier lieu à mon directeur de recherche, Monsieur Yves Audet, professeur à l'École Polytechnique de Montréal, pour m'avoir accepté au sein de son équipe de recherche. Son encadrement rigoureux et ses conseils judicieux m'ont guidé tout au long de mon projet.

Je tiens à remercier Messieurs Jean-Jules Brault et Jean-Pierre David, professeurs à l'École Polytechnique de Montréal et membres du jury, qui ont bien voulu prendre le temps de s'intéresser au sujet du présent mémoire et ont contribué à en améliorer la qualité.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à mes collègues de l'équipe de recherche (Groupe de Recherche en Microélectronique et Microsystèmes), pour m'avoir épaulé durant ces années de maîtrise et surtout pour m'avoir offert une ambiance de travail agréable et stimulante. La disponibilité des techniciens et des secrétaires du GRM a aussi été très appréciée.

Enfin, mes reconnaissances vont particulièrement à mes parents qui m'ont inculqué le goût du savoir et de la passion.

Résumé

Les travaux présentés dans ce mémoire sont destinés à étudier et à caractériser un capteur d'images numériques couleurs sans filtre optique, qui repose sur une nouvelle méthode de détection de la lumière. Les résultats d'une telle étude permettront d'analyser et de comprendre le comportement de ce nouveau concept, et d'apporter des améliorations pour les capteurs d'images qui seront fabriqués ultérieurement. Les applications visées concernent tout usage d'appareils photo numériques.

En premier lieu, nous avons étudié une méthode appropriée pour polariser les pixels de la matrice du capteur. Ceci a été réalisé à partir d'un circuit FPGA et des composants électroniques discrets, permettant ainsi d'appliquer un champ électrique aux bornes de chaque pixel de la matrice selon la séquence de lecture privilégiée.

Par la suite, nous avons procédé à la mise au point d'un système de control, réalisé en interfaçant le capteur d'images avec l'ordinateur. Ceci permettra un suivi en temps réel de l'image capturée, et d'étudier le nouveau concept de détection d'images couleurs. Pour ce faire, nous avons également utilisé le circuit avec FPGA pour adresser les pixels du capteur et fournir les signaux de synchronisation à la carte de capture intégré dans l'ordinateur. Le signal vidéo a été converti par le circuit de transimpédance utilisant les composants discrets, avant d'être envoyé à la carte de capture Corona-II. Finalement, un banc de test et un circuit imprimé qui tient compte des contraintes de l'environnement de test ont été réalisés.

La contribution principale dans ce projet réside dans la conception d'un système complet capable d'étudier et de caractériser ce capteur d'images prototype. Il inclut le circuit de polarisation des pixels de la matrice, le circuit de lecture de la matrice, l'interfaçage du capteur avec l'ordinateur, ainsi que le banc de test. La programmation du FPGA, l'interfaçage du capteur et la carte de capture incluant les fichiers C++, Matlab et DCFs

(Digitizer Configuration Format) nécessaires, ainsi que le banc de test ont été entièrement conçus dans le cadre de ce projet. Le circuit de polarisation et celui de lecture, quoique celui-ci soit basé sur les topologies du push-pull et de l'amplificateur de transimpédance précédemment connues, a été revu pour être adapté à cette application.

Lors des tests, une grande partie du temps a été consacrée à deux défis majeurs. Le premier a été la minimisation, voire l'élimination de l'influence mécanique du champ magnétique sur le circuit de lecture et sur les composants optiques du banc de test, qui rend difficile la caractérisation du capteur car dans ce cas, l'effet magnétique du concept et celui perturbateur agissant sur l'alignement optique sont superposés. Le deuxième défi était de pouvoir illuminer seulement la partie du capteur réservée à la détection de la lumière. Sinon, étant donné que les transistors de sélection des colonnes ne sont pas entièrement immunisés contre la collection d'électrons et de trous créés par la lumière, il en résulte un courant circulant dans le sens opposé de celui provenant des pixels. Dans le même ordre d'idées, la partie électronique a été montée et validée sur une plaquette de prototypage avant d'être transférée sur un circuit imprimé. Le circuit imprimé tient compte des contraintes mécaniques du banc de test et permet de réduire le bruit induit aux signaux de sortie.

Les résultats de test démontrent la fonctionnalité du système au complet. Ils exposent notamment sa capacité à caractériser, à valider et à extraire avec précision les paramètres du capteur d'images prototype. Les résultats obtenus sont concluants et prometteurs. Les charges générées par la radiation électromagnétique sont collectées par les trois électrodes du puits, la sensibilité du capteur augmente avec le champ magnétique tel que prévu par le concept, et le capteur répond différemment aux différentes longueurs d'onde du rayonnement, agissant ainsi comme un détecteur d'images couleurs sans filtre optique.

Abstract

In this thesis, we have studied and characterized a novel CMOS filterless color image sensor, which uses a new method of light detection. The results of this study allow for more understanding of the sensor's behaviour in real environment, which will be later taken in account for future image sensor design. The targeted applications encompass a wide range of digital cameras.

First of all, we studied a method to generate the proper biasing to the pixels of the sensor. This task was accomplished by the FPGA circuit and some discrete electronic components in order to apply sequentially an electric field to every pixel of the sensor according to the chosen scanning sequence of reading.

Secondly, a monitoring system was implemented. This has been accomplished by interfacing the image sensor with the computer. It allows a monitoring in real time of the captured picture in order to distinguish the right effect of the light detecting concept from the other perturbations effects. In order to do so, we also used the FPGA circuit for reading sensor's pixels and at the same time providing the synchronization signals to the frame grabber located inside the computer. Video signals were converted by transimpedance amplifiers made from discrete components, before being sent to the frame grabber. A testbench including a printed circuit board for all the described biasing and the interface electronics, taking into account the constraints of the test environment, was achieved.

The major contribution of this project was the design of a complete system able of studying and characterizing the prototype sensor. This includes the pixels biasing circuit, scanning and reading circuit, interfacing the sensor with the computer's frame grabber, the mechanical design of an appropriate testbench, as well as the characterization of the sensor. FPGA's programming, interfacing the sensor with the computer's frame grabber

including the essentials files C++, Matlab and DCFs have been entirely conceived in this project. Even though they are based on the well known structures of push-pull and the transimpedance amplifier, the biasing circuit has been adapted for this application.

During tests, we had to deal with two major challenges. The first one was the minimisation, and even eliminate if possible the mechanical influence of the magnetic field on the reading circuit and optic components. If not, the magnetic effect of the concept is blurred by mechanical displacement of the sensor board or the optic alignment. The second one was to be able to illuminate only the sensor's area reserved for light detection. Otherwise, given the fact that column select transistors were not entirely isolated from the collections of electrons and holes generated by illumination, result in an additional current flowing in the opposite direction compared to the one coming from the pixels. All the electronic circuits have been first realized and validated on the breadboard first before being transferred on a printed circuit board. The printed circuit board allows to reduce the effect of noise on the output video signals and was designed to take into account the constraints imposed by the testbench.

Through the test results, the entire system proves his capabilities to characterize, validate and to extract accurately key parameters of the prototype image sensor. Test results are conclusive and promising. Charges generated by the electromagnetic radiation are collected by the three electrodes of the well, the sensitivity of the sensor increases with the magnetic field as predicted by the concept, and the sensor responds differently to different wavelengths so acting as a filterless color image sensor.

Table des matières

| | |
|-----------------------------------------------------------------|--------------|
| REMERCIEMENTS | IV |
| RÉSUMÉ | V |
| ABSTRACT | VII |
| TABLE DES MATIÈRES | IX |
| LISTE DES FIGURES | XII |
| LISTE DES TABLEAUX | XVII |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES | XVIII |
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE 1 | 6 |
| PRINCIPE DE DÉTECTION D'IMAGES NUMÉRIQUES | 6 |
| 1.1 INTRODUCTION | 6 |
| 1.2 DÉTECTION D'UNE IMAGE..... | 7 |
| 1.3 ÉLÉMENT PHOTOSENSIBLE « PIXEL » | 8 |
| 1.3.1 Génération de paires électron-trou | 9 |
| 1.3.2 Recombinaison de paires électron-trou..... | 10 |
| 1.3.3 Coefficient d'absorption | 10 |
| 1.3.4 Efficacité quantique..... | 12 |
| 1.3.5 La réponse..... | 12 |
| 1.3.6 Le courant d'obscurité « dark current » | 13 |
| 1.3.7 Facteur de remplissage « fill factor » | 13 |
| 1.4 CAPTEURS D'IMAGES COURAMMENT UTILISÉS | 13 |
| 1.4.1 Capteurs d'images CCD | 14 |
| 1.4.2 Capteur d'images CMOS..... | 16 |
| 1.4.3 Capteurs d'images CCD versus capteurs d'images CMOS | 18 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.5 DÉTECTION DE LA COULEUR | 19 |
| 1.5.1 <i>Filtre de Bayer</i> | 20 |
| 1.5.2 <i>Capteur de Foveon multi-couches</i> | 23 |
| 1.6 CONCLUSION..... | 25 |
| CHAPITRE 2..... | 26 |
| NOUVELLE MÉTHODE DE DÉTECTION DE LA LUMIÈRE | 26 |
| 2.1 INTRODUCTION..... | 26 |
| 2.2 FORCE DE LORENTZ ET L'EFFET HALL | 26 |
| 2.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA NOUVELLE MÉTHODE DE DÉTECTION DE LA LUMIÈRE..... | 28 |
| 2.3.1 <i>Description du principe</i> | 28 |
| 2.3.2 <i>Analyse théorique</i> | 29 |
| 2.4 CONCEPTION DU CAPTEUR D'IMAGES PROTOTYPE | 32 |
| 2.4.1 <i>Architecture des pixels</i> | 34 |
| 2.4.2 <i>Multiplexeur Analogique</i> | 38 |
| 2.5 CONCLUSION..... | 38 |
| CHAPITRE 3..... | 39 |
| CIRCUIT DE LECTURE..... | 39 |
| 3.1 INTRODUCTION..... | 39 |
| 3.2 MATRICE DES PIXELS | 41 |
| 3.2.1 <i>Polarisation des pixels</i> | 43 |
| 3.2.2 <i>Méthode de balayage de la matrice des pixels</i> | 45 |
| 3.3 CIRCUIT D'ADRESSAGE..... | 48 |
| 3.4 AMPLIFICATEUR DE SORTIE..... | 60 |
| 3.5 INTERFAÇAGE AVEC ORDINATEUR..... | 63 |
| 3.5.1 <i>Carte de capture « Matrox corona-II »</i> | 65 |
| 3.5.2 <i>MIL et Intellicam</i> | 67 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.6 RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES VALIDANT LE FONCTIONNEMENT DU CIRCUIT DE LECTURE..... | 68 |
| 3.7 CONCLUSION..... | 73 |
| CHAPITRE 4..... | 74 |
| BANC DE TEST ET RÉSULTATS..... | 74 |
| 4.1 INTRODUCTION..... | 74 |
| 4.2 BANC DE TEST..... | 74 |
| 4.2.1 Montage mécanique..... | 75 |
| 4.2.2 Montage optique..... | 77 |
| 4.2.3 Montage électrique..... | 79 |
| 4.3 RÉSULTATS DE TESTS..... | 85 |
| 4.3.1 Validation du concept..... | 89 |
| 4.3.2 Effets non idéals dans l'image de sortie..... | 103 |
| 4.4 CONCLUSION..... | 108 |
| CONCLUSION GÉNÉRALE..... | 109 |
| BIBLIOGRAPHIE..... | 113 |
| ANNEXE..... | 117 |

Liste des figures

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1-1: Système d'acquisition d'une image de l'objet | 7 |
| Figure 1-2: Génération radiative d'une paire électron-trou | 9 |
| Figure 1-3: Absorption d'un flux photonique dans le silicium..... | 11 |
| Figure 1-4: Capacité MOS..... | 14 |
| Figure 1-5: Transfert de charges dans un capteur d'images CCD. a) Lecture d'une matrice de pixels. b) Exemple de transfert de charges d'un pixel à l'autre. | 15 |
| Figure 1-6: Principe d'opération de la photodiode. | 16 |
| Figure 1-7: Principe d'intégration..... | 17 |
| Figure 1-8: Filtres optique..... | 20 |
| Figure 1-9: Mosaïque du patron de Bayer. | 21 |
| Figure 1-10: Principe d'interpolation de la mosaïque de Bayer. | 22 |
| Figure 1-11: Pixel du capteur de Foveon..... | 23 |
| Figure 2-1 : a) Force de Lorentz et l'effet Hall. b) Représentation d'un vecteur perpendiculaire au plan..... | 26 |
| Figure 2-2: Principe de détection de la lumière de l'innovation..... | 29 |
| Figure 2-3: Schéma bloc d'un capteur d'images conçus à partir de l'innovation..... | 33 |
| Figure 2-4: Photomicrographie du prototype de capteur d'images..... | 34 |
| Figure 2-5: Architecture d'un pixel de la Matrice-I..... | 35 |
| Figure 2-6: Architecture d'un pixel de la Matrice-II. | 36 |
| Figure 2-7: Architecture d'un pixel de la Matrice-III. | 37 |
| Figure 3-1: Topologie générale du capteur d'images de 20x20 pixels..... | 40 |
| Figure 3-2: Architecture du capteur d'images prototype de la matrice-I..... | 41 |
| Figure 3-3: Polarisation d'une rangée de pixels de la matrice..... | 43 |
| Figure 3-4: Chemin parcouru par un signal vidéo, du pixel jusqu'à l'amplificateur de sortie..... | 44 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 3-5 : Redistribution des charges lors de la lecture de la matrice des pixels. a) Aucune rangée ni colonne n'est sélectionnée. b) Lorsqu'une rangée de la matrice est sélectionnée..... | 46 |
| Figure 3-6 : Diagramme temporel de la lecture de la matrice. | 47 |
| Figure 3-7 : Méthode de lecture continue « progressive scan »..... | 48 |
| Figure 3-8 : Schéma bloc du circuit FPGA..... | 49 |
| Figure 3-9 : Circuit anti-rebond. | 51 |
| Figure 3-10 : Mesure du courant de polarisation, ainsi que de la résistance d'un pixel de la matrice..... | 55 |
| Figure 3-11 : Mesure du courant de polarisation de toute la matrice, selon la stratégie de polarisation adoptée. | 57 |
| Figure 3-12 : Circuit intermédiaire entre les sorties du FPGA et les bus de rangées du capteur d'images. | 59 |
| Figure 3-13 : Modules qui composent l'amplificateur de sortie..... | 61 |
| Figure 3-14 : Schéma d'interfaçage de la carte de capture de l'ordinateur et les différents modules du capteur d'images..... | 64 |
| Figure 3-15 : Diagramme de synchronisation de données entre la carte de capture et les modules du capteur d'images..... | 65 |
| Figure 3-16 : Schéma de l'architecture interne de la carte de capture Corona-II. | 66 |
| Figure 3-17 : Montage de validation du circuit de lecture..... | 68 |
| Figure 3-18 : La sortie du capteur d'images illuminé par un faisceau laser rouge. a) image résultat montrant le gradient d'intensité, b) la sortie multiplexée pour les trois électrodes du pixel affichée par l'oscilloscope, et qui correspond au signal d'entrée de l'image a). | 69 |
| Figure 3-19 : Balayage de la matrice de pixels et affichage sur l'écran d'ordinateur. a) Les pixels d'une rangée de la matrice. b) Affichage horizontale d'un pixel de la matrice. c) Affichage verticale d'un pixel de la matrice. d) Image affichée de 200 x 200 pixels..... | 70 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 3-20 : La sortie du capteur d'images a) image résultante, b) La sortie multiplexée pour l'électrode bleu du pixel affichée par l'oscilloscope et qui correspond au signal d'entrée de l'image a). | 71 |
| Figure 3-21 : La sortie multiplexée pour les trois électrodes du pixel, et qui correspond à la rangée la plus illuminée de la figure 5-19 b) | 72 |
| Figure 4-1 : Électro-aimant. a) La photographie de l'électro-aimant. b) Vue de face de l'électro-aimant. | 75 |
| Figure 4-2 : Courbe de magnétisation de l'électro-aimant. | 77 |
| Figure 4-3 : Schéma du montage optique. | 78 |
| Figure 4-4 : La photographie du circuit imprimé et le capteur d'images à l'intérieur de l'électro-aimant. | 80 |
| Figure 4-5 : Circuit imprimé 1, a) Vue recto. b) Vue verso. | 81 |
| Figure 4-6 : Le circuit imprimé 2 contenant le capteur d'images. | 84 |
| Figure 4-7 : Photographie du banc de test général. | 86 |
| Figure 4-8 : Courbe d'hystérésis de l'électro-aimant. | 87 |
| Figure 4-9 : Courbe d'hystérésis de l'électro-aimant agrandie. | 88 |
| Figure 4-10 : La sortie couleur du capteur d'images, pour un faisceau laser rouge. a) La sortie simultanée pour les trois électrodes sans champ magnétique telle qu'affichée par l'oscilloscope. b) L'image couleur résultat qui correspond au signal d'entrée de l'image a). c) La sortie simultanée pour les trois électrodes avec un champ magnétique telle qu'affichée par l'oscilloscope. d) L'image couleur résultante correspondant au signal d'entrée de l'image c). | 90 |
| Figure 4-11 : La sortie couleur du capteur d'images, pour un faisceau laser vert. a) La sortie simultanée pour les trois électrodes sans champ magnétique telle qu'affichée par l'oscilloscope. b) L'image couleur résultante qui correspond au signal d'entrée de l'image a. c) La sortie simultanée des trois électrodes avec un champ magnétique telle qu'affichée par l'oscilloscope. d) L'image couleur résultante qui correspond au signal d'entrée de l'image c. | 92 |

Figure 4-12: La sortie de la neuvième rangée du capteur d’images, pour un faisceau laser rouge. a) La sortie des trois électrodes sans champ magnétique. b) L’image monochrome qui correspond au signal bleu d’entrée de la figure a. c) La sortie des trois électrodes avec un champ magnétique entrant. d) L’image monochrome qui correspond au signal bleu d’entrée de la figure c. e) La sortie des trois électrodes avec un champ magnétique sortant. f) L’image monochrome qui correspond au signal bleu d’entrée de la figure e. 94

Figure 4-13: La réponse absolue du capteur d’images en fonction du champ magnétique (traits pleins (laser rouge), traits brisés (laser vert)..... 97

Figure 4-14: Le comportement du capteur à la réponse maximale..... 98

Figure 4-15: Augmentation de la réponse du capteur d’images en fonction du champ magnétique (traits pleins (laser rouge), traits brisés (laser vert)..... 100

Figure 4-16: Mesure de la linéarité du capteur pour différentes valeurs de champ magnétique..... 101

Figure 4-17: La sortie de la dixième rangée du capteur d’images pour un faisceau laser rouge. a) Les sorties des trois électrodes sans champ magnétique. b) Les sorties des trois électrodes avec un champ magnétique..... 103

Figure 4-18: propagation de charges entre deux pixels voisins. 104

Figure 4-19 : a) Signal vidéo de l’électrode bleue lorsque la matrice est illuminée. b) Région des rangées non illuminées, et sélectionnée sur la figure (a) agrandie..... 106

Figure 4-20: La coupe verticale d’un transistor NMOS de sélection. 106

Figure 4-21: L’injection de charges dans un commutateur..... 107

Figure A-1: Le schématique du circuit imprimé 1..... 118

Figure A-2: Le schématique du circuit imprimé : a) Circuit imprimé 3, b) Alimentations du circuit imprimé 1, c) Connexion entre le circuit imprimé 1 et le circuit imprimé 2 119

Figure A-3: Le circuit imprimé (vue verso)..... 120

Figure A-4: Le circuit imprimé (vue recto) 121

Figure A-5: Le dessin de masque du circuit imprimé (vue verso)..... 122

Figure A-6: Le dessin de masque du circuit imprimé (vue milieu, couche d'alimentation).
..... 123

Figure A-7: Le dessin de masque du circuit imprimé (vue recto) 124

Liste des tableaux

Tableau 4-1 : calcul de résidu.....102

Liste des abréviations et sigles

Abréviations

| | |
|------|-----------------------------------------|
| A/N | Analogique/Numérique |
| CCD | Charge Coupled Device |
| CMOS | Complementary Metal Oxide Semiconductor |
| DC | Direct Current |
| DCF | Digitizer Configuration Format |
| FF | Fill Factor |
| FPGA | Field Programmable Gate Array |
| MIL | Matrox Image Library |
| PCB | Printed Circuit Board |
| RF | Radio Frequency |

Sigles

| | |
|----------|------------------------------------------------------------------|
| α | Coefficient d'absorption du matériau (cm^{-1}), |
| B | Norme du vecteur champ magnétique (Tesla) |
| c | Vitesse de la lumière (m/s). |
| Clk | Clock |
| E_g | Largeur de la bande interdite du silicium (1.12 eV). |
| f | Distance focale |
| Fe | Force électrique |
| F_0 | Intensité du flux à la surface du silicium ($photons/cm^2 s$), |
| h | Constante de Planck, |
| Hsync | Horizontal Synchronisation |
| I_{ph} | Courant de photons produit, |

| | |
|------------|------------------------------------------|
| λ | Longueur d'onde du photon incident (nm), |
| n | Indice de réfraction, |
| q | Charge de l'électron (coulomb), |
| R | Réponse (Ampères/Watt), |
| σ_p | Conductivité des trous |
| θ_H | Hall Angle |
| μ_n | Mobilité des électrons. |
| μ_p | Mobilité des trous |
| η | Rendement quantique. |
| ν | Fréquence électromagnétique du photon |
| Vsync | Vertical Synchronisation |

Introduction

Le capteur d'images est, au sein de l'appareil photo numérique, l'équivalent de la pellicule chimique présente dans son homologue analogique. Son rôle est identique : convertir les rayons lumineux qui le frappent en une image fixe, intelligible à l'œil humain. En revanche, l'image est figée de manière différente dans les deux cas : modification chimique des cristaux d'halogénure pour l'analogique ; la conversion de la lumière incidente en un nombre équivalent de charges photogénérées à l'intérieur du pixel, l'intégration et le stockage de ces charges, l'accès séquentiel à l'information représentée par ces charges, et le traitement des signaux correspondants pour leur lecture et transmission dans le cas du capteur d'images numérique. Le capteur d'images numérique constitue une extension énorme de la fonctionnalité optoélectronique. Le silicium, le semi-conducteur sur lequel se base la microélectronique et notre entière société informatisée, constitue l'élément clé pour ces capteurs d'images numérique. Le silicium n'est pas seulement capable d'effectuer des calculs, mais il est aussi un détecteur de lumière efficace, en particulier dans la partie visible du spectre électromagnétique.

On distingue plusieurs types de capteurs, le CCD (Charge Coupled Device) étant le plus répandu. Le CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) en représente un dérivé. Le terme CCD ou CMOS n'a rien avoir avec le capteur d'images. « Charge Coupled Device » décrit la technologie utilisée pour stocker et transférer les charges photogénérées dans un pixel, alors que « Complementary Metal Oxide Semiconductor » est le nom de la technologie utilisé pour la fabrication de transistors sur le substrat. Le rôle d'un capteur d'images n'est pas seulement de convertir l'intensité lumineuse en électrons, mais il faut penser également à l'accès et au traitement de ces charges photogénérées. La différence fondamentale entre ces deux technologies CCD et CMOS réside dans la façon et l'endroit où ces tâches du capteur sont accomplies. Dans le cas du capteur CCD, tout le traitement du signal est réalisé par un module externe du circuit de

capteur. Seulement la conversion de photons en électrons est réalisée à l'intérieure du pixel, et ainsi une grande partie du pixel est réservée à la détection de l'information de l'image. Quant au capteur CMOS, le module de traitement analogique et numérique d'image, sont intégrés sur le même substrat que le capteur lui-même, réduisant ainsi l'espace sensible à la lumière. Evidement, cette espace supplémentaires dans les capteurs CCD, permet aux cameras CCD de capturer plus de lumière, et ainsi produire des images de qualité supérieure que celles capturées par les cameras CMOS. En revanche, les cameras CMOS se distinguent avant tout par son procédé de fabrication, similaire à celui des circuits intégrés et microprocesseurs. En conséquence, ils possèdent un faible coût de fabrication et une consommation électrique réduite, ce qui lui donne des avantages de poids face à son homologue CCD.

Ces capteurs d'images (à semi-conducteur) peuvent, donc profiter directement du progrès incessant de la microélectronique. En effet, ce progrès a vu un développement exponentiel, si prévisible qu'on parle de la « loi » de Moore : Chaque 18 mois, le nombre de transistors sur un circuit intégré se double. En même temps, la taille des transistors était réduite, et aujourd'hui une dizaine de transistors trouvent place sur une surface de 1 micromètre carré ! Pour cette raison il est devenu possible de fournir chaque capteur photonique individuel « pixels » avec de la fonctionnalité électronique. De nos jours, les cameras numérique de type 6 Méga pixels pour l'usage familiale ne sont plus un rêve. La qualité d'une image dépendra évidemment de sa définition ou résolution, c'est à dire le nombre de pixels que l'on mettra dans chaque centimètre carré (ou une autre unité de surface). Les photographes le savent bien que lorsque la densité de pixels est insuffisante, certains détails de l'image ne seront plus représentés. Donc, depuis quelques années, la résolution est le facteur dominant dans l'achat d'un appareil photo numérique. Les fabricants l'ont bien compris et se sont lancés dans une course effrénée aux pixels. Or, on ne peut pas augmenter la résolution d'un capteur indéfiniment sans augmenter la taille de celui-ci. La taille minimale d'un pixel est limitée par la

technologie (les limites liées à l'avancée de la science). Autrement dit, la taille minimale d'un transistor que la technologie actuelle est capable de fabriquer.

Cependant, les lois fondamentales de la physique ne sont plus les seules limites de la résolution du capteur d'images numériques, mais également la manière actuelle que les concepteurs de capteurs utilisent pour détecter la couleur. Remarquez que, ni le capteur CCD, ni le capteur CMOS ne détectent la longueur d'ondes (la couleur) de la source lumineuse, ces deux photodétecteurs ne mesurent que la luminance, ce qui donne une image monochrome. Afin de reconstituer les valeurs de chrominance, chaque élément photosensible (pixel) est recouvert d'un filtre coloré, ne laissant passer que les rayons d'une certaine longueur d'onde (rouge, vert, et bleu). La plupart des capteurs disposent de filtres disposés de la manière suivante : bleu - vert - bleu - vert... sur la première ligne, vert - rouge - vert - rouge... sur la seconde, et la routine est répétée et disposée judicieusement au-dessus de chaque cellule photosensible. Cette mosaïque couramment employée est nommée « *Le patron de Bayer* ». Ainsi, chaque cellule photosensible mesure l'intensité lumineuse d'une seule couleur primaire. Il manque alors de l'information : les valeurs de rouge et de vert pour les pixels correspondant aux cellules photosensibles recouverts d'un filtre bleu, de bleu et de vert pour ceux pourvus d'un filtre rouge, etc. Le processeur intégré à l'appareil numérique doit, pour récupérer les mesures manquantes, réaliser une interpolation de couleurs. C'est-à-dire qu'il calcule les informations complémentaires en se basant sur la couleur mesurée par les pixels adjacents. Cette méthode donne lieu à d'excellents résultats la plupart du temps, mais révèle parfois ses limites en ajoutant un délai de traitement et des erreurs d'interpolation. Remarquez que dans ce genre de capteurs d'images couleurs, la résolution d'une image couleur est moindre que la résolution affichée par le nombre total de pixels qui compose le capteur.

En 2002, la compagnie Foveon a mis au point un capteur d'images permettant à chacun de ses pixels de donner une information complète sur la luminance et la couleur, sans

recourir au dépôt de filtres optiques, ni au processus d'interpolation. Il exploite la propriété du silicium d'absorber différemment la lumière selon la longueur d'onde du faisceau. Le capteur est donc constitué de trois couches de silicium dopées et superposées judicieusement, afin de discriminer les trois couleurs primaires. En outre, Foveon n'a pas réussi à conquérir le marché de capteurs d'images, car leur capteur n'est pas fabriqué en procédé CMOS standard et ainsi possède un coût de production élevé. De plus, leur sensibilité demeure inférieure à celle des caméras utilisant le patron de Bayer. Les caméras fabriquées avec les capteurs Foveon sont des caméras de qualité semi-professionnelle (*Sigma*), à cause de leurs coûts d'achat élevés.

Ce mémoire consiste à étudier et à valider le nouveau concept de détection de la lumière qui a été mis au point par le Professeur Yves Audet, et qui lui a valu un brevet d'invention. La nouvelle méthode de détection de la lumière repose également sur la capacité du silicium d'absorber différemment la lumière selon leur longueur d'ondes. C'est-à-dire, leur couleur. Contrairement au capteur de Foveon, celui-ci dispose de trois électrodes par pixel capable de discriminer les différentes charges selon leur profondeur de provenance, c'est-à-dire leur couleur. Par conséquent, cette nouvelle méthode de détection de la couleur constitue une avancée importante de la photo numérique, car elle permettra d'augmenter la résolution spatiale et la qualité de l'image, tout en réduisant le coût de production (suppression du filtre optique,). Un seul pixel sera capable de détecter les trois couleurs primaires sans recours aux filtres, ni la superposition de différentes couches de silicium dopées. Afin d'étudier ce nouveau concept, trois différentes matrices de 20 pixels par 20 pixels (20x20 pixels) chacune, servant de prototype ont été fabriquées. Il s'agit donc de concevoir un circuit capable de polariser convenablement les pixels de la matrice, d'adresser, de lire et d'afficher en temps réel sur l'ordinateur chaque pixel du capteur. Durant la phase de conception d'un banc de test, un soin particulier doit être apporté pour effectuer les mesures aussi précises que possible, et être capable de différencier l'effet perturbateur dû aux déplacements mécanique, de l'effet magnétique du concept recherché. La dernière phase du projet consiste à valider expérimentalement ces

outils. Pour cela, des mesures seront effectuées sur le capteur prototype plongé dans un champ magnétique, ainsi reconstituant les conditions du concept.

Ce mémoire est composé des quatre chapitres suivants : 1) le principe de détection d'images numériques, 2) nouvelle méthode de détection de la lumière, 3) circuit de lecture, 4) banc de test et résultats, et finalement une conclusion générale. En plus d'introduire le contexte et le sujet, le premier chapitre expose le phénomène de photogénération, ainsi que les paramètres de caractérisations existants. Le second présente le nouveau concept de détection de la lumière de cette innovation. Les deux chapitres suivants détaillent la phase de conception d'un circuit de lecture et le banc de test suivi des résultats synthétisés et discutés.

CHAPITRE 1

Principe de détection d'images numériques.

1.1 Introduction

Depuis des années, l'homme est connecté avec son environnement grâce à son système visuel. Ce dernier n'est pas le seul moyen que l'homme utilise pour être en contact avec son environnement, mais c'est le plus important. Cette interaction de l'homme et la nature est rendue possible par la présence de la lumière comme le soleil dans l'environnement. Même si la présence de la lumière toute seule constitue pour l'homme une information à part entière comme par exemple le soleil qui pourra lui informer du début d'une journée (la lève du soleil) ou la fin de la journée (le couché du soleil), elle est également une source lumineuse. En effet, les rayons réfléchis par les objets de l'environnement constituent des images qui seront par la suite captées par l'œil humain, interprétées par le cerveau, et finalement permet à l'homme de distinguer la couleur de ces objets, leur contraste, leur forme,... etc. C'est de cette façon que l'homme entre en contact avec son entourage du point de vue visuel.

De nos jours, on voit de plus en plus des machines dotées d'une vision électronique, ou des appareils photos qui reproduisent les images capturées dans l'environnement. Le principe de détection reste le même qu'avec la vision humaine, bien entendu avec certaines limites. D'abord, l'environnement doit être détecté et converti en signaux intelligibles avec les processeurs électroniques. Autrement dit, pour accomplir cette tâche, les capteurs d'images utilisent un matériau capable de convertir les photons réfléchis par les objets en signal électrique.

Ce chapitre fournit les notions sur l'usage du silicium pour réaliser cette tâche de conversion de photons en signal électrique. L'interaction au niveau physique des photons et le matériau (le silicium), ainsi que certains paramètres mesurés pour l'analyse de la performance de conversion comme le phénomène de génération de paires électron-trou, le coefficient d'absorption, le rendement quantique et la réponse sont analysés dans la section 1.3 de ce chapitre. La section 1.4 traite deux types d'éléments photosensibles les plus utilisés dans les capteurs d'images actuels, qui sont la capacité MOS pour les capteurs d'images CCD, et la photodiode pour les capteurs CMOS. Finalement, la section 1.5 analyse les deux différentes techniques (filtre de Bayer et le capteur de Foveon) utilisées pour rendre ces photodétecteurs sensibles aux longueurs d'onde des photons incidents.

1.2 Détection d'une image

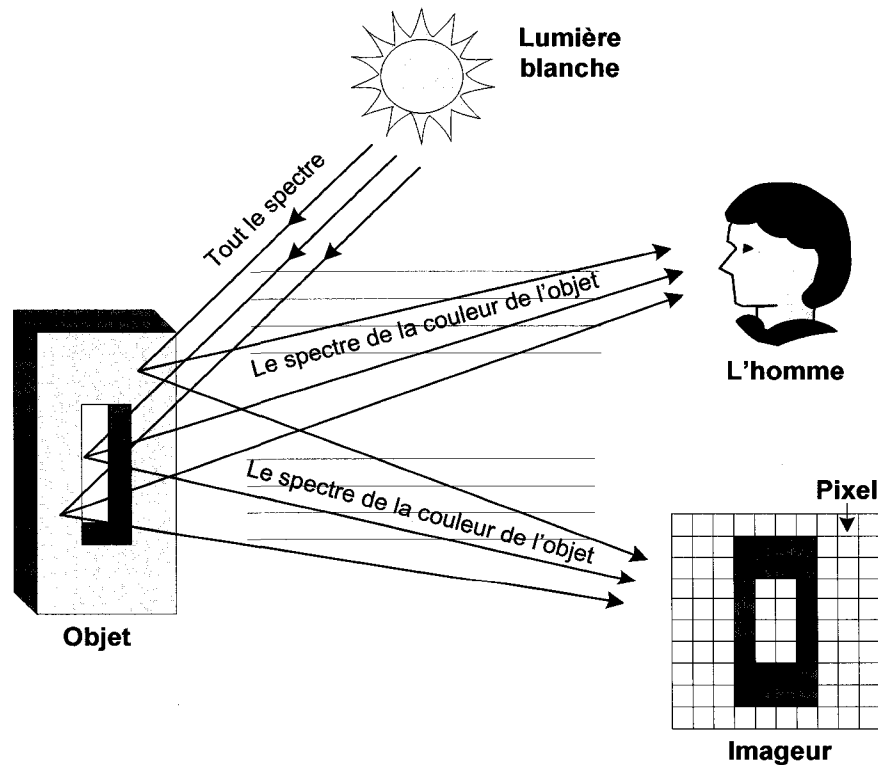


Figure 1-1: Système d'acquisition d'une image de l'objet

L'œil humain a la capacité de détecter les rayons lumineux provenant directement d'une source de lumière comme le soleil, ou de détecter les rayons réfléchis provenant de l'objet. C'est de cette façon que nous pouvons voir les objets de la nature. Le soleil ou une autre source lumineuse éclaire un objet, et ce dernier réfléchit à son tour les rayons lumineux dans la nature. Lorsque ces photons réfléchis atteignent l'œil humain, ils sont convertis en un signal électrique selon leur intensité, et envoyés au cerveau pour y être interprétés. Si l'objet illuminé absorbe toutes les longueurs d'onde qui lui parviennent, et ne réfléchit aucune, le cerveau l'interprète comme une couleur noire. S'il absorbe quelques longueurs d'onde, et réfléchit les autres, le cerveau l'interprète comme une couleur. Et si toutes les longueurs d'onde sont réfléchit équitablement, le cerveau l'interprète comme une couleur blanche.

Le principe des capteurs d'images repose sur le fonctionnement de l'œil humain. Les rayons réfléchis contenant l'information de l'objet, sont projetés dans le plan du capteur, composé à son tour par des petits carreaux appelés « pixels ». Ces derniers sont des éléments photosensibles qui convertissent et stockent l'information lumineuse en une information électrique (une tension ou un courant facilement manipulable par d'autres modules électronique) dans leur localisation dans la matrice du capteur. Par la suite, la matrice du capteur sera échantillonnée et traitée afin de reconstituer l'image de l'objet en question.

1.3 Élément photosensible « pixel »

Un pixel de l'imageur est constitué non seulement du système de détection des photons, mais il inclut également un mécanisme qui permet d'accéder et de lire les photons détectés. Dans ce qui suit, nous analysons certains phénomènes physiques ainsi que les paramètres de performance pour le silicium, un matériau (semi-conducteur) de choix pour les circuits intégrés et les capteurs d'images.

1.3.1 Génération de paires électron-trou

Lors qu'un photon d'énergie $h\nu$ est absorbé par un atome de silicium, ce dernier libère un de ces électrons de valence par une transition de bande (passage entre la bande de valence et la bande de conduction) et laissant derrière lui un atome non neutre. Cette place laissée vide de l'atome est nommée un trou. Par conséquent, une paire électron-trou est générée dans le silicium en présence d'un photon tel qu'illustré sur la figure 1-2, ci-dessous [8].

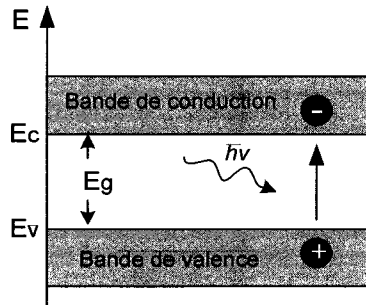


Figure 1-2: Génération radiative d'une paire électron-trou

La transition de la bande à une autre n'est possible que lorsque l'énergie $h\nu$, du photon absorbé, est supérieure ou égale à la largeur de la bande interdite E_g .

Avec h : constante de Planck,

ν : Fréquence électromagnétique du photon, et

E_g : Largeur de la bande interdite du silicium (1.12 eV).

$$h\nu \geq E_g = E_C - E_V \quad (1-1a)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{E_g} \approx 1.1\mu m \quad (1-1b)$$

où c est la vitesse de la lumière. Le silicium est transparent aux photons incidents dont la longueur d'onde est inférieure ou égale à $1.1\mu m$ λ_{\max} du spectre visible.

Alors, une fois les photons convertis en électrons et en trous, il reste à collecter ces charges générées pour un traitement ultérieur (le déplacement de charges négatives s'additionne au déplacement de charges positives en sens opposé, et tous participent au courant photonique total). Ceci est souvent réalisé en appliquant un champ électrique via la jonction PN (photodiode), ou en induisant un champ électrique par une tension appliquée à la grille d'une structure MOS (capacité MOS). Ces deux méthodes sont détaillées dans la section 1.4, ci-dessous.

1.3.2 Recombinaison de paires électron-trou

La recombinaison de paires électron-trou est un mécanisme inverse à la génération de paires électron-trou, car il s'agit dans ce cas d'un électron libre, par exemple un électron venant du premier processus radiatif de génération de paires électron-trou ou venant d'un autre processus non radiatif comme l'effet thermique, qui se recombine avec un trou. Donc, lorsqu'un électron libre arrive à proximité d'un ion positif (un trou), il peut être capté par ce dernier afin de rétablir sa stabilité (rendre l'atome neutre).

1.3.3 Coefficient d'absorption

Tel que mentionné dans la section 1.3.1 précédente, lorsqu'un photon incident dont l'énergie $h\nu \geq E_g$ est absorbé, il génère une paire électron-trou dans le silicium qui l'a absorbé. Dans ce qui suit, nous analysons ce phénomène d'absorption dans le cas où une tranche de silicium est irradiée par un flux photonique $F(x)$ tel qu'illustré sur la figure 1-3, ci-dessous [20] et [36].

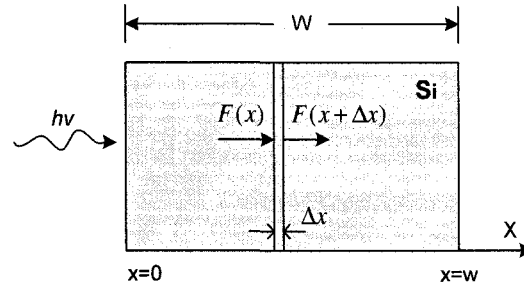


Figure 1-3: Absorption d'un flux photonique dans le silicium.

Au fur et à mesure que le flux des photons se propage dans le silicium suivant l'axe des x , une proportion d'intensité du flux est absorbée par le silicium. Cette absorption optique est caractérisée par une constante de proportionnalité α nommée « *Coefficient d'absorption* » du matériau (silicium), défini comme [8], [20] et [36] :

$$\alpha = \frac{1}{F(x)} \frac{dF(x)}{dx} \quad (1-2)$$

En résolvant l'équation (1-2) ci-dessus, on remarque que l'intensité du flux photonique se propageant dans le silicium selon la direction des x , suit une loi exponentielle :

$$F(x) = F_0 e^{-\alpha x} \quad (1-3)$$

Avec $F(x)$: intensité du flux photonique à la profondeur x ($photons/cm^2 s$),

F_0 : Intensité du flux à la surface du silicium $x = 0$ ($photons/cm^2 s$), et

α : Coefficient d'absorption du matériau (cm^{-1}).

L'ordre de grandeur de la profondeur du silicium, capable d'absorber un rayonnement, est donné par $1/\alpha$ (cm). Il est déjà connu que pour le silicium monocristallin, la profondeur d'absorption est de $0.77\mu m$ pour le bleu moyen (470nm), $1.11\mu m$ pour le vert moyen (530nm), et de $2.5\mu m$ pour le rouge moyen (650nm) [1]. En effet, plus la longueur d'onde du rayonnement est courte, plus la profondeur de pénétration est faible. Ce *coefficient d'absorption* α , dépend directement de la longueur d'onde du rayonnement.

1.3.4 Efficacité quantique

Chacun des photons incidents atteignant la surface du silicium ne génèrent pas forcément une paire électron-trou. Également, due à la recombinaison des porteurs, toutes les paires électron-trou générées ne contribuent pas au courant photonique. Une des mesures de la sensibilité du semi-conducteur face à la radiation photonique, est le *rendement quantique* η . Il définit le nombre d'électron-trou générés dans le silicium par rapport aux photons incidents pour une longueur d'onde donnée [8] :

$$\eta = \frac{\text{Paires}_{\text{électrons-trou}}_{\text{générées}}}{\text{Photons}_{\text{incidents}}} \quad (1-4)$$

Le silicium est moins sensible aux longueurs d'onde (entre 400nm et 700nm) que l'œil humain, mais beaucoup plus sensible aux longueurs d'onde proche de l'infrarouge. C'est la raison pour laquelle, un filtre optique est souvent placé devant le détecteur, afin de bloquer l'infrarouge, et de laisser seulement la bande visible atteindre le détecteur.

1.3.5 La réponse

Dans la même logique de caractériser un photodétecteur, on définit la *réponse*, R (Ampères/Watt), comme étant le rapport du courant de photons produit, I_{ph} et la puissance lumineuse reçue, P , à une longueur d'onde donnée.

$$R = \frac{I_{ph}}{P} \quad (1-5)$$

La réponse est reliée à la longueur d'onde du rayon incident par [8]:

$$R = q\eta \left(\frac{\lambda}{hc} \right) \quad (1-6)$$

Avec q : Charge de l'électron (coulomb),

η : Rendement quantique,

λ : Longueur d'onde de la radiation incidente (nm),

h : Constante de Planck et

c : Vitesse de la lumière (m/s).

La réponse R , n'est significative que lors qu'on connaît la longueur d'onde de la radiation incidente.

1.3.6 Le courant d'obscurité « dark current »

Parallèlement à la génération de paires électron-trou dans le silicium sous la radiation photonique tel que mentionné dans les sections précédentes, l'effet thermique provoque également une génération de paires électron-trou dans le matériau. L'agitation thermique d'un réseau cristallin du silicium produit une énergie suffisante pour la génération de paires électron-trou. Ce courant d'électrons générés thermiquement est nommé, *courant d'obscurité*, car c'est un courant d'origine non radiative (absence d'une radiation photonique). Il s'ajoute au courant photonique, et constitue une source de bruit. D'où l'intérêt à minimiser ces charges thermiques lors de la conception d'un capteur d'images, par exemple en réduisant la température du capteur (minimiser la puissance dissipée par le capteur).

1.3.7 Facteur de remplissage « fill factor »

Tel que mentionné auparavant, un pixel consacre une partie de sa surface à la détection de la lumière, et une autre partie à la lecture et au traitement des charges générées dans le détecteur (quelques transistors de lecture intégrés dans le pixel). Donc, le facteur de remplissage FF (*Fill Factor*) est un indicateur (en pourcentage) de cette surface réservée à la détection de la lumière (photosite) par rapport à la surface totale du pixel.

1.4 Capteurs d'images couramment utilisés

La majorité des capteurs d'images ont vu le jour, en se basant sur cet effet photoélectrique (génération de paires électron-trou dans le silicium) discuté dans les

sections précédentes, et en implémentant une stratégie d'accès à l'information contenue dans les différents pixels qui composent l'imageur (échantillonner la matrice de pixels). Deux types de capteurs d'images (capteurs d'images CCD et capteurs d'images CMOS) dominent présentement le marché des capteurs. Leurs principes de fonctionnement, ainsi que leurs différences sont analysés dans les sections suivantes.

1.4.1 Capteurs d'images CCD

L'élément photosensible dans les capteurs d'images CCD (Charge Coupled Device) est la capacité MOS.

La capacité MOS

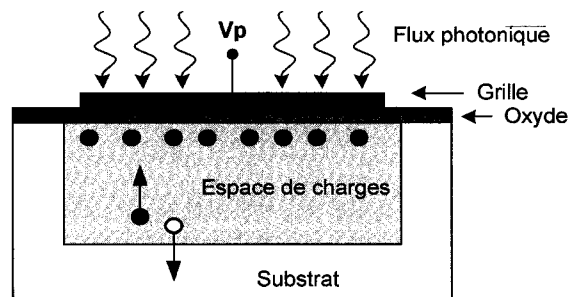


Figure 1-4: Capacité MOS.

Une grille est formée sur un substrat de type P (ou type N), tel que présenté sur la figure 1-4. Lorsque la tension de polarisation V_p appliquée à la grille atteint une tension près de la tension de seuil, le semi-conducteur en dessous de la grille est dépeuplé de porteurs majoritaires (dépeuplement de trous sous la grille dans le cas d'un substrat de type P de la figure 1-4). Par conséquent, il y a une création d'un espace de charges sous la grille. Cette région est connue sous le nom de zone de *déplétion*. La lumière passe à travers l'électrode et génère des paires électron-trou dans le semi-conducteur. Grâce à l'effet du champ électrique, le photoélectron est attiré sous la grille, et le trou est repoussé dans le fond du substrat ou vice-versa, dépendamment du type de dopage du substrat et de la

tension V_p . De cette façon, il y a une accumulation de charges (photoélectrons) directement proportionnelle à l'intensité lumineuse sous la grille.

Transfert de charges

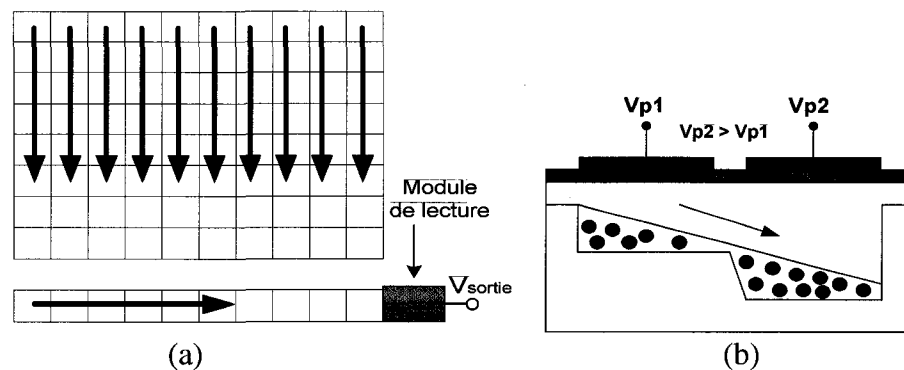


Figure 1-5: Transfert de charges dans un capteur d'images CCD. a) Lecture d'une matrice de pixels. b) Exemple de transfert de charges d'un pixel à l'autre.

Une fois les charges (photoélectrons) accumulées sous la grille de la capacité MOS, l'étape qui suit est de les transférer vers un module de lecture (conversion de charges en une tension) tel qu'illustré sur la figure 1-5a. Le transfert de charges s'effectue grâce aux différentes phases d'horloges verticales et horizontales. Les charges sont transférées d'une ligne à une autre vers un registre à décalage horizontal, où elles seront par la suite transférées vers un module de lecture. Afin de pouvoir transférer les charges d'un pixel à un autre, chaque pixel est constitué d'une ou de plusieurs grilles tel que montré à la figure 1-5b. On définit *l'efficacité de transfert de charges* comme étant le pourcentage de charges transférées d'une ligne à l'autre. Cette constante (*l'efficacité de transfert de charges*) donne une indication sur la quantité de charges perdues lors du transfert, et la plupart du temps, c'est elle qui fixe la taille de la matrice des capteurs CCD.

1.4.2 Capteur d'images CMOS

Dans les capteurs d'images CMOS, l'élément qui assure la conversion de photons en charges électriques (paires électron-trou) est la photodiode. Le principe d'opération de ce composant est analysé dans la section suivante.

Photodiode

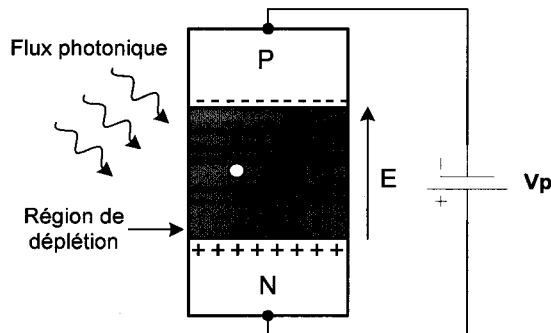


Figure 1-6: Principe d'opération de la photodiode.

Lorsque deux types de semi-conducteur (type-N et type-P) sont mis côte à côte, il en résulte une région de dépeuplement de charges à la frontière des deux, dite région de *déplétion*. Et lorsque les photons sont absorbés dans cette région de déplétion, les paires électron-trou générées sont séparées par le champ électrique E augmenté par la tension de polarisation inverse V_p . Les électrons sont envoyés du côté N et les trous du côté P. Les charges négatives et les charges positives contribuent directement au courant photonique. Les charges générées en dehors de la région de déplétion sont soit recombinés et ne contribuent pas au courant photonique, ou arrivent à diffuser de la zone neutre vers la région de déplétion et par conséquent contribuent au courant photonique. La distance maximale de la zone neutre qu'un porteur peut franchir et atteindre la région de déplétion, est une propriété intrinsèque du matériau.

Mode d'intégration

Les capteurs d'images de grande résolution comportent de photodiodes de petites dimensions. Il en résulte un courant de la photodiode très faible et difficile à manipuler lors de la lecture du capteur. Afin de palier à ce problème de faible courant, la plupart des capteurs utilisant les photodiodes opèrent en *mode d'intégration* afin d'augmenter la sensibilité du pixel. La figure 1-7, illustre ce mode de fonctionnement.

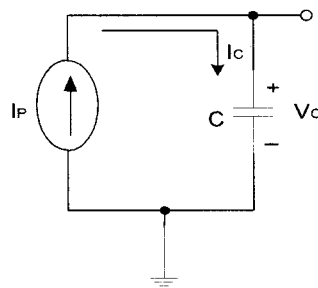


Figure 1-7: Principe d'intégration

Le courant I_{ph} de la figure 1-7 correspond au courant résultant de la photodiode qui est proportionnel aux photons incidents atteignant la zone de déplétion. Ce courant charge la capacité et génère une tension, V_C aux bornes de la capacité selon :

$$I_c = C \frac{dV_C}{dt} \quad (1-7)$$

On obtient alors :

$$dV_C = \frac{1}{C} I_p dt \quad (1-8)$$

En intégrant les deux côtés de l'équation (1-8), avec le temps d'intégration allant de t_A à t_B , on a :

$$\int_{t_A}^{t_B} dV_C = \frac{1}{C} \int_{t_A}^{t_B} I_p dt \quad (1-9)$$

La résolution de l'équation (1-9), donne :

$$V_C(t_B) - V_C(t_A) = \frac{I_P}{C}(t_B - t_A) \quad (1-10)$$

$$\text{Puis : } \Delta V_C = \frac{\Delta t}{C} I_P \quad (1-11)$$

Selon l'équation (1-11), le courant de la photodiode est converti en tension facile à manipuler par rapport au courant, dont le gain est de $\frac{\Delta t}{C}$. Donc, l'ajustement du temps d'intégration Δt , permet d'augmenter le gain de transrésistance du courant photonique, I_P , de façon à détecter de très faibles courants de la photodiode.

1.4.3 Capteurs d'images CCD versus capteurs d'images CMOS

Étant donné que la technologie CCD a été optimisée juste pour la détection d'images, les capteurs CCD continuent à dominer les capteurs CMOS au niveau de la qualité de l'image. Mais, à part la qualité d'image, les capteurs CMOS sont vus comme les capteurs du futur grâce aux différents avantages qu'ils offrent face aux capteurs d'images CCD, dont les plus primordiales sont:

- **Coût de production** : La technologie CCD n'est pas standard, elle est chère comparativement à la technologie CMOS standard qui est offerte par plusieurs compagnies fabricants des circuits intégrés.
- **Consommation de puissance** : La technologie CMOS est réputée pour sa faible consommation de puissance. Dans le cas de la technologie CCD, plusieurs horloges sollicitent continuellement la grille pour charger et décharger la capacité MOS et ainsi accomplir le transfert de charges. A l'ère actuelle où les cameras sont utilisées dans les téléphones mobiles, les ordinateurs portables, ...etc, la consommation de puissance est un point déterminant dans le choix d'une technologie.
- **Capacité d'intégration** : Étant la technologie standard pour les circuits intégrés, la technologie CMOS permet d'intégrer le détecteur de la lumière et le module de traitement analogique et numérique du capteur sur le même substrat. Une

flexibilité que la technologie CCD n'est pas capable d'offrir. Donc, la technologie CMOS permet de réaliser des capteurs d'images autonomes et complets, avec plusieurs fonctionnalités sur le même circuit intégré. De nos jours, il existe même des capteurs d'images CMOS dotés de convertisseurs A/N intégrés au niveau du pixel, dont certaines applications peuvent être intéressantes comme dans la vision robotisée.

1.5 Détection de la couleur

Tel que mentionné précédemment, l'œil humain est sensible aux longueurs d'onde allant de 400nm à environ 700nm, la gamme dite visible. Lorsque ces longueurs d'onde visibles sont réfléchies avec la même énergie, le cerveau humain l'interprète comme une couleur blanche. Lorsqu'elles sont réfléchies avec différentes énergies pour différentes longueurs d'onde, le cerveau l'associe à une des couleurs de cette bande visible. Autrement dit, le terme couleur, correspond à la réponse que l'œil humain donne aux différentes longueurs d'onde de cette bande visible. Par exemple, la longueur d'onde la plus longue de cette bande visible 700nm est associée à la couleur rouge, tandis que la plus courte 400nm est associée au violet. Dans le cas des imageurs électroniques, ni la capacité MOS, ni la photodiode n'est capable de déterminer la longueur d'onde (la couleur) du rayon incident générateur des paires électron-trou dans le matériau. Ces deux éléments photosensibles couramment utilisés sont intrinsèquement monochromes. Ils sont rendus aptes à détecter la couleur au moyen de filtres optiques déposés sur leurs surfaces comme dans le cas du *patron de Bayer*, ou par la détection en profondeur utilisée par la compagnie *Foveon*, tel qu'il sera détaillé dans les sections suivantes.

1.5.1 Filtre de Bayer

Le patron de *Bayer* emploie des filtres optiques, afin de séparer les différentes longueurs d'onde.

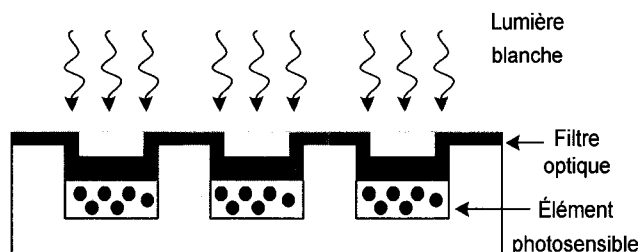


Figure 1-8: Filtres optique.

La figure 1-8 illustre la méthode des filtres optique utilisée pour déterminer la couleur. Cette couche est appelée filtre optique, car elle bloque ou absorbe certaines longueurs d'onde de la lumière visible, tout en laissant passer quelques unes. Comme l'exemple de la figure 1-8, on utilise trois filtres pour détecter les trois couleurs primaires : bleu, vert et rouge. Lorsqu'une lumière blanche (toutes longueurs d'onde) atteint un filtre optique, ce derniers absorbe toutes les longueurs d'onde du rayonnement, sauf celui correspondant à la longueur d'onde d'intérêt qui est autorisée à passer à travers le filtre et atteindre l'élément photosensible (capacité MOS ou photodiode). Dans le cas de la figure 1-8, le filtre bleu ne laisse passer que la gamme de longueurs d'onde correspondant au bleu, le filtre vert laisse passer seulement que la gamme de longueurs d'onde qui correspond au vert,.. etc. De cette façon, on peut identifier la couleur associée au rayon incident générateur de paires électron-trou dans le détecteur.

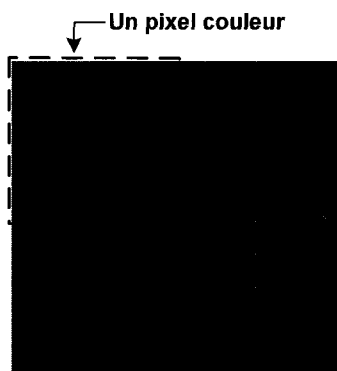


Figure 1-9: Mosaïque du patron de Bayer.

Le patron de *Bayer* correspond à la mosaïque couramment employée dans les capteurs d'images couleurs, où un pixel couleur est représenté par quatre sous-pixels (un pixel rouge, un pixel bleu et deux pixels verts) tel qu'illustré sur la figure 1-9. Ce patron est répété et disposé judicieusement au-dessus de chaque cellule photosensible.

Une image comprend deux types d'informations : une information sur la luminance (la clarté de l'image) et une deuxième information sur la chrominance (la couleur). Il a été démontré que le système de vision humain est beaucoup plus sensible à la luminance (distinguer les détails dans une image) qu'à la chrominance. La relation (1-12) ci-dessous, relie la luminance Y aux trois couleurs de bases (rouge, verte et bleue) :

$$Y = \frac{Rouge}{3} + Verte + \frac{Bleue}{10} \quad (1-12)$$

Cette relation (1-12) met en évidence la contribution de chaque couleur parmi les trois couleurs primaires (rouge, verte et bleue) à la luminance. On y remarque que la longueur d'onde associée à la couleur verte prend une grande partie dans la composition de la luminance par rapport aux deux autres couleurs rouge et bleue. Autrement dit, même si toutes les couleurs contribuent à la luminance, la couleur verte donne plus d'information sur la luminance par rapport autres couleurs. C'est la raison pour laquelle dans le patron de Bayer, 50% des pixels sont alloués à l'échantillonnage de la couleur verte, tandis que seulement 25% des pixels sont réservés à l'échantillonnage de la couleur rouge et également 25 % pour la couleur bleue.

Interpolation

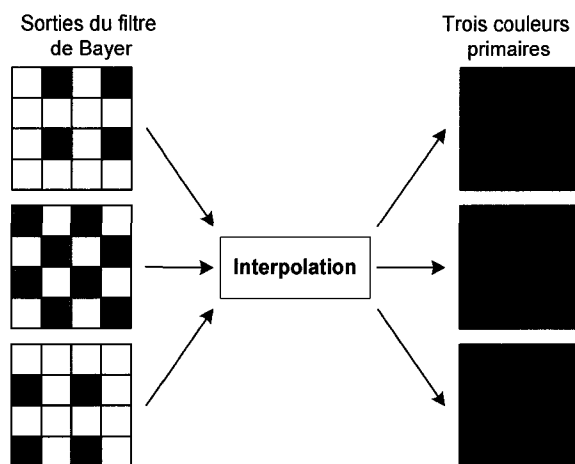


Figure 1-10: Principe d'interpolation de la mosaïque de Bayer.

Étant donné que chaque pixel composant le patron de Bayer ne capture qu'une seule couleur, le processus d'interpolation consiste à restituer les deux autres couleurs manquantes, permettant ainsi de récupérer une image complète pour chacune des couleurs primaires (rouge, verte et bleue) tel qu'illustré sur la figure 1-10. Plusieurs algorithmes d'interpolation font l'objet de recherche, mais le plus simple et couramment utilisée est dite, *interpolation linéaire*, et consiste à restituer les couleurs manquantes à partir de la couleur du pixel en question et la couleur de ses pixels voisins.

Inconvénients du patron de Bayer

- Le patron de Bayer est l'une des principales limitations de la résolution spatiale des capteurs d'images. Cette aptitude du capteur (résolution spatiale), est évaluée par le nombre de pixels par unité de surface. Tel qu'on peut le constater sur la figure 1-9, chacun des sous-pixels ne peut détecter qu'une couleur. L'interpolation pratiquée pour reconstituer la couleur à chacun des sites photosensibles fait en sorte de diminuer la résolution spatiale.
- Du point de vue rendement quantique tel que défini précédemment à l'équation (1-5), il doit être révisée afin de tenir compte des pertes de luminosité encourues

dans les filtres optique. Donc, le rendement quantique réel η est représenté comme le produit du rendement quantique interne du silicium η_i et le rendement quantique optique η_o (rapport du flux de photons pénétrant dans le silicium au flux de photons incident sur la surface de filtres optique). $\eta = \eta_i \eta_o$. A la surface de filtres optique, une partie de rayons incidents est réfléchié et une autre partie est réfractée. En tenant compte de l'indice de réfraction, n du matériau du filtre optique, le rendement optique est défini comme [8]:

$$\eta_o = \frac{4n}{(n+1)^2} \quad (1-13)$$

Il est à noter qu'un rendement optique d'environ 100% est possible, moyennant une couche antireflet déposée sur la surface des filtres optiques.

- L'ajout d'une couche de filtres optique, ainsi que le module d'interpolation dans le capteur d'images augmente le coût de production final du capteur. Sans toute fois ignorer les erreurs d'interpolation dans la qualité de l'image résultante.

1.5.2 Capteur de Foveon multi-couches

Récemment, en l'an 2002, la compagnie Foveon basée à Santa Clara en Californie, a mis au point un capteur d'images couleur CMOS sans filtres optique. Son principe de détection repose sur l'utilisation du silicium comme étant un filtre vertical tel qu'illustré sur la figure 1-11 ci-dessous [18] et [29] :

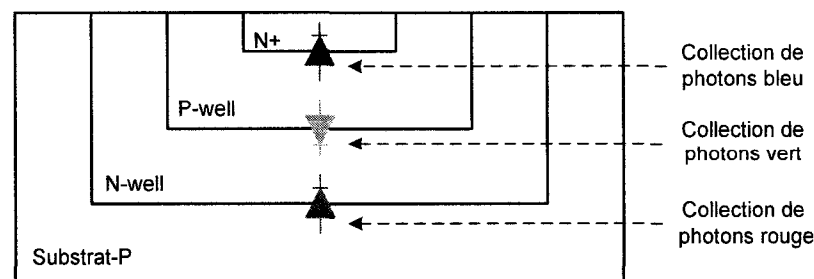


Figure 1-11: Pixel du capteur de Foveon.

Il s'agit de trois photodiodes implantées à des différentes profondeurs du silicium. Le flux photonique atteignant la surface du silicium décroît exponentiellement selon sa longueur d'onde. Les paires électron-trou associées à la longueur d'onde de la couleur bleue sont générées proche de la surface du silicium, celles associées à la couleur verte sont générées environ de la surface jusqu'au milieu de la tranche de silicium, et finalement celles associées à la couleur rouge sont générées de la surface jusqu'au fond du silicium. La collecte des charges générées à différentes profondeurs avec les photodiodes superposées, permet de discriminer les trois couleurs primaires : bleue, verte, et rouge.

Il faut noter que la couleur bleue, verte, et rouge attribuée aux trois photodiodes sur la figure 1-11 facilitent la compréhension. En réalité, la photodiode proche de la surface tracée en bleue collecte toutes les longueurs d'ondes du visible, celle du centre tracée en vert collecte les longueurs d'ondes allant du vert au rouge, et que celle au fond du substrat tracée en rouge collecte majoritairement la longueur d'onde associée au rouge.

Inconvénients du capteur de Foveon

Contrairement au filtre de Bayer, chaque élément photosensible (pixel) du capteur de Foveon capture une information complète sur la luminance et sur la couleur. Il en résulte une image complète et claire dépourvue d'erreurs d'interprétation comme dans le cas du patron de Bayer. Ceci rend le capteur de Foveon avantageux et intéressant pour le marché des capteurs d'images couleur, mais le handicap majeur est que :

- Le capteur n'est pas fabriqué en procédé CMOS standard et ainsi possède un coût de production élevé.
- La largeur limitée des zones désertées des diodes superposées augmente la capacité de jonction et diminue le coefficient de conversion charge-tension, et
- Les différentes diodes remontent en surface, et leurs régions frontalières entre le silicium et l'oxyde de silicium, favorisent le courant de fuite.

1.6 Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre était de donner une vision assez large sur la manière employée jusqu'à présent pour la détection d'images. Le comportement et certains paramètres physiques du semi-conducteur utilisé pour convertir les photons en signal électrique ont été analysés. Dans la section 1.4, nous avons décrit deux types d'éléments photosensibles les plus présents dans les capteurs d'images actuels, la capacité MOS utilisée dans les capteurs CCD, et la photodiode utilisée dans les capteurs CMOS. Ces derniers sont considérés de nos jours comme étant les capteurs d'images du futur, grâce aux nombreux avantages qu'ils offrent par rapport à son rival CCD. Quant à la section 1.5, elle a montré les limites de la capacité MOS et de la photodiode à la distinction de longueurs d'onde du photon incident. En revanche, elle a présenté deux méthodes utilisées actuellement dans les capteurs d'images pour reconnaître la longueur d'onde du faisceau incident, une emploie les filtres optiques (patron de Bayer), et l'autre utilise trois photodiodes superposées (capteur de Foveon).

Compte tenu des limites et des inconvénients que ces deux méthodes de détection de la couleur induisent au capteur d'images, il y a encore du travail à faire dans ce domaine. C'est la raison pour laquelle les prochains chapitres se concentrent sur l'analyse d'un nouveau principe de détection de la lumière exploitant les propriétés physiques du silicium, et ainsi permettant la mise au point d'un capteur d'images couleurs CMOS sans utilisation de filtres optique ou de la superposition de photodiodes.

CHAPITRE 2

Nouvelle méthode de détection de la lumière

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, le nouveau principe de détection de la lumière est expliqué. Le chapitre commence avec une information générale sur les notions de la force de Lorentz et l'effet Hall dans la section 2.2. Ceci est suivi par une discussion détaillée sur le principe de fonctionnement de la nouvelle méthode de détection de la lumière dans la section 2.3. La section 2.4 est dédiée à la conception du capteur. Elle donne une vision globale de l'architecture du capteur prototype. Le circuit intégré de test, est composé de trois matrices de pixels différentes, toutes basées sur la nouvelle méthode de détection de la lumière, et chaque matrice des pixels sera discutée séparément dans cette section du chapitre.

2.2 Force de Lorentz et l'effet Hall

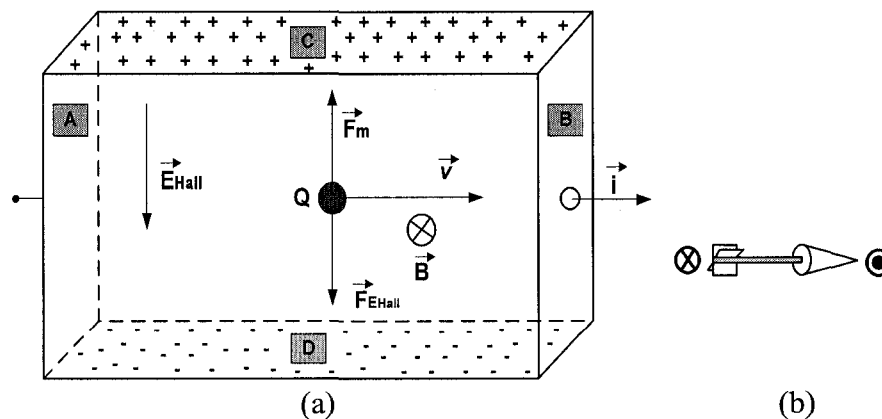


Figure 2-1 : a) Force de Lorentz et l'effet Hall. b) Représentation d'un vecteur perpendiculaire au plan.

Tel qu'illustré sur la figure 2-1(a), un semi-conducteur parcouru par un courant électrique de la face A à la face B, est plongé dans une induction magnétique perpendiculaire à la direction du courant. Selon cette même figure 2-1(a), on y montre également ce qui se passe à l'échelle microscopique, au niveau d'une charge Q qui se déplace avec une vitesse \vec{v} dans ce champ magnétique entrant, caractérisé par le vecteur \vec{B} . Cette charge Q est déviée par une force \vec{F}_m appelée *Force de Lorentz*, qui agit sur elle, résultat du produit vectoriel entre $Q\vec{v}$ et \vec{B} [9]:

$$\vec{F}_m = Q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$F_m = |QvB \sin \theta|$$

Avec : Q : la charge en coulomb, portée par une particule en mouvement

v : la vitesse de la charge (m/s)

B : la norme du vecteur champ magnétique (Tesla)

θ : l'angle formé par $Q\vec{v}$ et \vec{B}

On comprend bien que cette force magnétique est maximale lorsque l'angle θ est égal à 90 degrés. Donc, elle est perpendiculaire au plan formé par $Q\vec{v}$ et \vec{B} , et son sens est déterminé par la règle de la main droite.

Selon le produit vectoriel de la figure 2-1(a), ces charges déviées par le champ magnétique vont se diriger vers la face supérieure C, en s'y accumulant, ainsi vont créer une différence de potentiel et par conséquent un champ électrique nommé \vec{E}_{Hall} . La tension entre les deux faces C et D est appelée *la tension de Hall*. À son tour, ce champ électrique E_{Hall} va agir sur le flux des charges qui lui a donné naissance en créant une force $\vec{F}_{E_{Hall}}$ opposée à la force de Lorentz.

Également, il est à noter que le sens du champ électrique \vec{E}_{Hall} dépend de la nature des porteurs. Lorsqu'il s'agit d'un courant de trous comme le cas de la figure 2-1(a),

l'accumulation de charges positives sur la face supérieure C, fera en sorte que la tension de Hall entre la face C et D soit positive, et ainsi le champ électrique résultant \overline{E}_{Hall} est dirigé de C vers D tel que l'illustre la figure 2-1(a). Tandis que dans le cas des électrons, ça sera des charges négatives qui vont s'accumuler sur la face C, et par conséquent une tension de Hall négative entre C et D, et un champ électrique \overline{E}_{Hall} dirigé vers la face supérieure C.

2.3 Principe de fonctionnement de la nouvelle méthode de détection de la lumière

2.3.1 Description du principe

Tel que mentionné dans le chapitre précédent, le silicium absorbe différemment la lumière selon sa longueur d'onde (phénomène de pénétration du rayonnement électromagnétique). Le principe de détection de la lumière de cette innovation repose principalement sur cette propriété d'absorption de la lumière par le silicium, ainsi que de la force de Lorentz discutée dans la section précédente 2.2 de ce chapitre. C'est une nouvelle méthode de collection des charges différente de celle employée par la capacité MOS (camera CCD) ou de la photodiode [1].

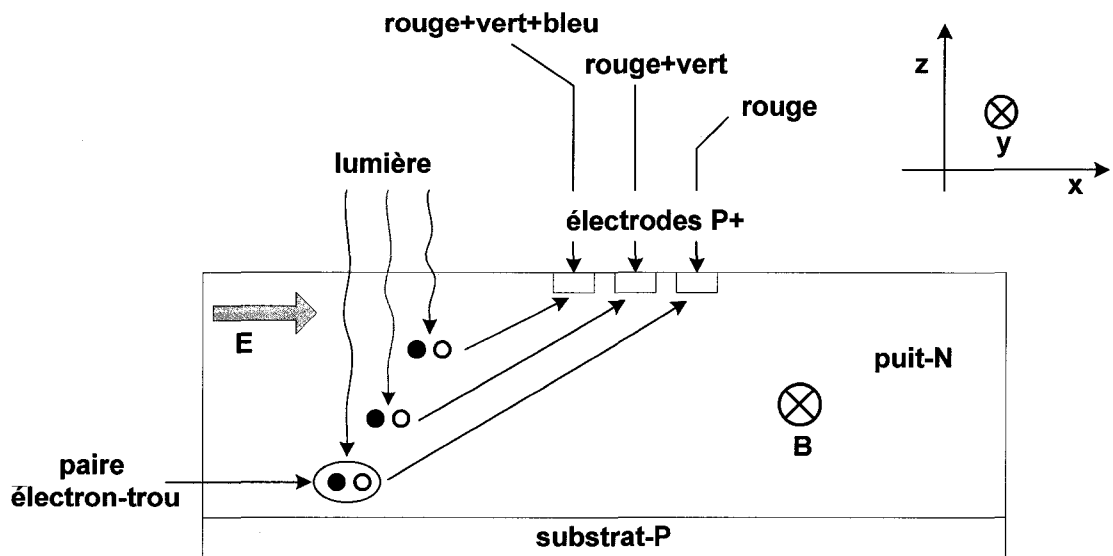


Figure 2-2: Principe de détection de la lumière de l'innovation.

La figure 2-2, présente la méthode de détection. Le rayonnement électromagnétique de différentes longueurs d'onde pénètre le puits-N qui est soumis à un champ électrique E , orienté selon l'axe des x . Les paires électron-trou générées par le rayonnement sont séparées et accélérées par ce champ électrique E . Un champ magnétique appliqué selon l'axe des y crée une trajectoire courbe pour les charges de sorte qu'ils montent à la surface du substrat de silicium, tel qu'illustré sur la figure 2-2 dans le cas des trous. Le point d'arrivée de chaque trou à la surface selon l'axe x , sera fonction de la profondeur de départ du trou, donc de la longueur d'onde du rayonnement générateur de ce trou. Ainsi, trois électrodes positionnées judicieusement à la surface du substrat pourront discriminer les trois couleurs bleu, verte et rouge du patron de Bayer en récoltant le courant de trous correspondants.

2.3.2 Analyse théorique

Pour une tranche de silicium de type N, comme c'est le cas de la figure 2-2, la densité de courant d'électrons $J_n(0)$ lorsqu'aucun champ magnétique n'est appliqué, est une

superposition du courant de dérive $\sigma_n E$ et du courant de diffusion $qD_n \nabla n$. Elle est exprimée comme [24]:

$$J_n(0) = \sigma_n E + qD_n \nabla n \quad (2-1)$$

Avec : $\sigma_n = q\mu_n n$ = la conductivité des électrons

E = le champ électrique

q := la charge d'un électron

$$D_n = \mu_n \frac{kT}{Q} = \text{constante de diffusion d'un électron}$$

n = la densité d'électrons

Et lorsque cette structure est soumise à un champ magnétique non nul, la densité de courant d'électrons $J_n(B)$ suit la relation suivante :

$$J_n(B) = J_n(0) - \mu_n^* (J_n(B) \times B) \quad (2-2)$$

Avec : μ_n^* = la mobilité des électrons.

En développant l'équation (2-2), nous avons :

$$J_n(B) = \left[J_n(0) + \mu_n^* (B \times J_n(0)) + (\mu_n^*)^2 (B \cdot J_n(0)) B \right] \left[1 + (\mu_n^* B)^2 \right]^{-1} \quad (2-3)$$

En supposant que les porteurs sont distribués uniformément dans le matériau, la composante de courant de diffusion est nulle et la relation (2-3) devient :

$$J_n(B) = \sigma_{nB} \left[E + \mu_n^* (B \times E) + (\mu_n^*)^2 (B \cdot E) B \right] \quad (2-4)$$

$$\text{Avec, } \sigma_{nB} = \frac{\sigma_n}{(1 + (\mu_n^* B)^2)}$$

Remarquez que pour le champ magnétique perpendiculaire avec le champ électrique tel que le cas de la figure 2-2, $B \cdot E = 0$, et par conséquent l'équation (2-4) devient :

$$J_n(B) = \sigma_{nB} \left[E + \mu_n^* (B \times E) \right] \quad (2-5)$$

Selon le principe de fonctionnement du nouveau capteur illustré à la figure 2-2, les électrodes P+ forment avec le puits-N (riche en électrons libres) une jonction PN

polarisée en inverse. Donc, il n'y a pratiquement pas de courant d'électrons dirigés vers les trois électrodes P+ dans la direction des z positive :

$$J_{nz}(B) = \sigma_{nB} [E_z - \mu_n^* B_y E_x] = 0 \quad (2-6)$$

Alors, nous considérons seulement la densité de courant des trous, qui peut être exprimée de la même manière que celle des électrons :

$$\bar{J}_p(B) = \sigma_{pB} [\bar{E} - \mu_p^* (\bar{B} \times \bar{E})] \quad (2-7)$$

Avec :

σ_p = la conductivité des trous

\bar{E} = Vecteur du champ électrique

μ_p^* = la mobilité des trous

\bar{B} = Vecteur du champ magnétique

Cette densité de courant de trous subie un champ magnétique orientée dans la direction de y positive (0, By, 0), le champ électrique initial orientée dans la direction de x positive (Ex, 0,0), ainsi qu'un deuxième champ électrique orienté dans la direction de z positif (0, 0, Ez) dû à l'*effet Hall*. A partir de l'équation (2-7) et du nouveau vecteur du champ électrique résultat (Ex, 0, Ez), la densité de courant des trous peut être exprimée individuellement selon que le vecteur du champ électrique pointe dans la direction de x positive ou dans la direction de z négative.

$$J_{px}(B) = \sigma_{pB} [E_x - \mu_p^* B_y E_z] \quad (2-8a)$$

$$J_{pz}(B) = \sigma_{pB} [E_z + \mu_p^* B_y E_x] \quad (2-8b)$$

Selon l'équation (2-6), nous pouvons exprimer E_z en fonction de E_x et B_y

$$E_z = \mu_n^* B_y E_x \quad (2-9)$$

En substituant l'égalité (2-9) dans l'équation (2-8), nous avons :

$$J_{px}(B) = \sigma_{pB} E_x [1 - \mu_p^* \mu_n^* B_y^2] \quad (2-10a)$$

$$J_{pz}(B) = \sigma_{pB} E_x [\mu_n^* B_y + \mu_p^* B_y] \quad (2-10b)$$

Finalement, l'angle de déviation de la densité de courant des trous θ_H connu sous le nom de « *Angle de Hall* », par rapport au champ électrique initial peut être exprimé à partir de l'équation (2-10) :

$$\theta_H = \arctg\left(\frac{J_{pz}}{J_{px}}\right) = \arctg\left(\frac{\mu_n^* B_y + \mu_p^* B_y}{1 - \mu_p^* \mu_n^* B_y^2}\right) \quad (2-11)$$

Cet angle de déviation ne dépend pas du champ électrique appliqué dans la direction des x positive E_x , mais du champ magnétique appliqué dans la direction des y positive B_y et du type de semiconducteur employé (la mobilité des charges). Ceci implique théoriquement, que ce nouveau principe de détection de la couleur peut être appliqué à tous les procédés CMOS commercialisables.

2.4 Conception du capteur d'images prototype

Afin de simplifier la notation et pour une bonne distinction des figures, les notations suivantes vont être employées dans la partie restante de ce mémoire:

- **La couleur bleue ou le mot électrode bleue** : est associé à la pénétration de la longueur d'onde qui correspond à la couleur bleue tel qu'illustré sur la figure 2-2. Mais, en réalité et tel que le montre également cette même figure 2-2, elle capte les trois couleurs bleue, verte et rouge.
- **La couleur verte ou le mot électrode verte** : est associé à la pénétration de la longueur d'onde qui correspond à la couleur verte, mais tel que la figure 2-2 l'illustre, elle capte les deux couleurs bleue et verte.
- **La couleur rouge ou le mot électrode rouge** : est associé à la pénétration de la longueur d'onde qui correspond à la couleur rouge. Et tel que l'illustre la figure 2-2, cette électrode ne capte que du rouge.

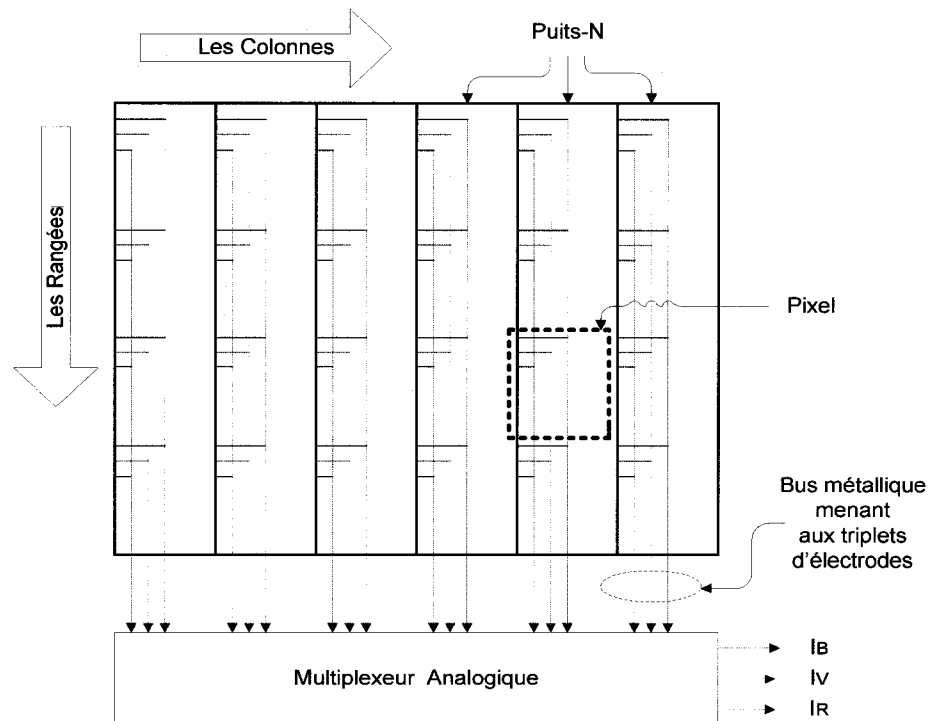


Figure 2-3: Schéma bloc d'un capteur d'images conçu à partir de l'innovation.

La figure 2-3, présente le schéma bloc simplifié d'un capteur d'images conçu à partir de l'innovation. Chacune des colonnes de pixels est formée d'un puits-N continue où les triplets d'électrodes sont disposés perpendiculairement et séparés les uns des autres par une largeur de pixel. Etant donné que le champ magnétique a pour effet de contrôler la trajectoire des trous, il n'est pas nécessaire d'avoir une délimitation physique entre deux pixels voisins de la même colonne afin d'éviter le débordement des porteurs d'un pixel à l'autre. Par conséquent, la hauteur d'un pixel est fixée par la disposition des électrodes sur une même colonne, et ainsi permet d'augmenter la résolution spatiale du capteur d'images résultant. Par contre, l'électronique associée au pixel délimite sa largeur. Les électrodes des pixels d'une même colonne partagent les mêmes bus métalliques, qui sont à leur tour connectés au multiplexeur analogique.

Architecture du capteur

Un prototype de 20 pixels par 20 pixels d'un capteur d'images basé sur cette nouvelle méthode de détection de la lumière a été fabriqué en technologie CMOS standard (AMIS 0.5 μ m). La photomicrographie du capteur est montrée à la figure 2-4 ci-dessous :

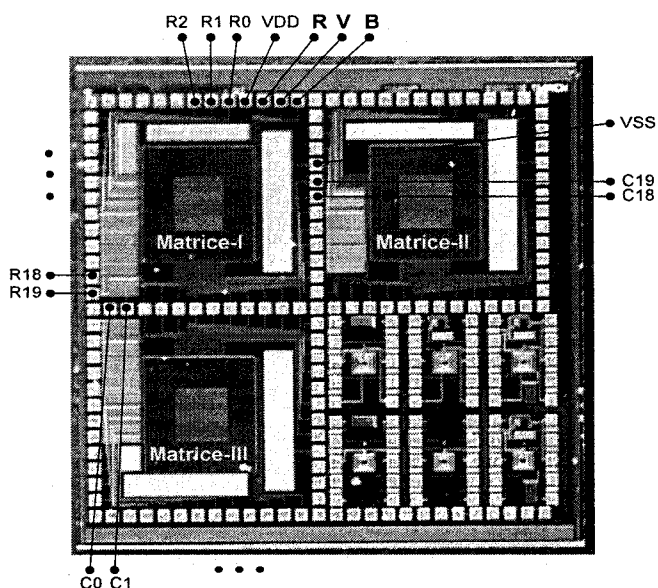


Figure 2-4: Photomicrographie du prototype de capteur d'images.

2.4.1 Architecture des pixels

Tel qu'illustré sur la figure 2-4, le circuit prototype est composé de trois différentes matrices. Cette différence réside au niveau de l'architecture de leurs pixels.

a. Matrice -I

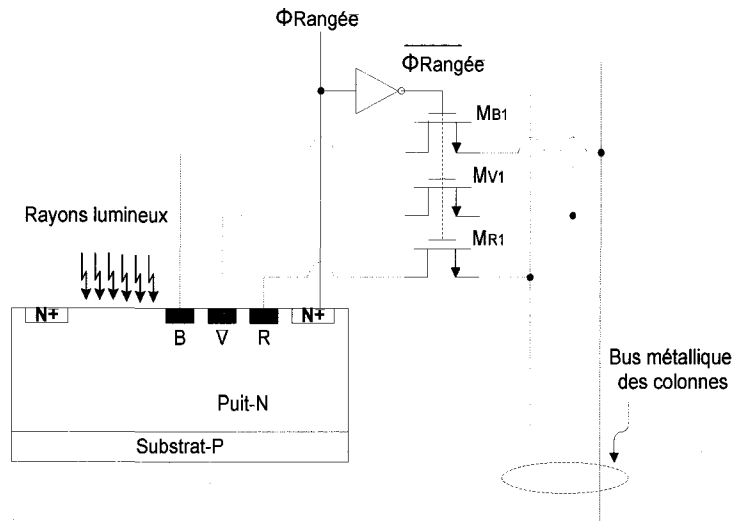


Figure 2-5: Architecture d'un pixel de la Matrice-I.

La figure 2-5, montre l'architecture d'un pixel employé pour réaliser les 20 pixels par 20 pixels de la matrice-I. Les paires électron-trou sont générées dans le puits-N par les rayons lumineux, et sont séparées et accélérées par un champ électrique créé par la différence de potentiel appliquée aux électrodes de contact (N+) grâce au signal sélecteur de rangée $\phi_{Rangée}$. Les trois électrodes bleue, verte, et rouge de lecture, sont formées à partir d'un dopage de type P (P+) afin de former, avec le puits-N, une diode polarisée en inverse. De cette façon, on évite de collecter les électrons libres qu'on retrouve en abondance dans le puits-N et on collecte seulement les trous générés par les rayons lumineux. Enfin, les trois triplets d'électrodes sont connectés aux bus métalliques de la colonne par les trois transistors NMOS de sélection MB1, MV1, et MR1, qui sont activés par le signal $\overline{\phi_{Rangée}}$. Ceci permet d'accéder à un pixel particulier dans toute la matrice, en lisant seulement le pixel de la rangée activée dans toute la colonne. La matrice des pixels est lue d'une façon sérielle.

La figure 2-4, montre également le capteur de la matrice-I avec ses pads d'entrées et de sorties, où les bus sélecteurs de rangées sont accessibles via les pads R_0 jusqu'à R_{19}

respectivement, et de C_0 jusqu'à C_{19} pour ceux des colonnes. La masse du substrat et celles des inverseurs sont accessibles à partir du pad V_{SS} , alors que l'alimentation positive des inverseurs est accessible par le pad V_{DD} . Finalement, les trois sorties d'électrodes multiplexées sont accessibles via les pads R pour les électrodes rouges, V pour les électrodes vertes, et B pour les électrodes bleues.

b. Matrice -II

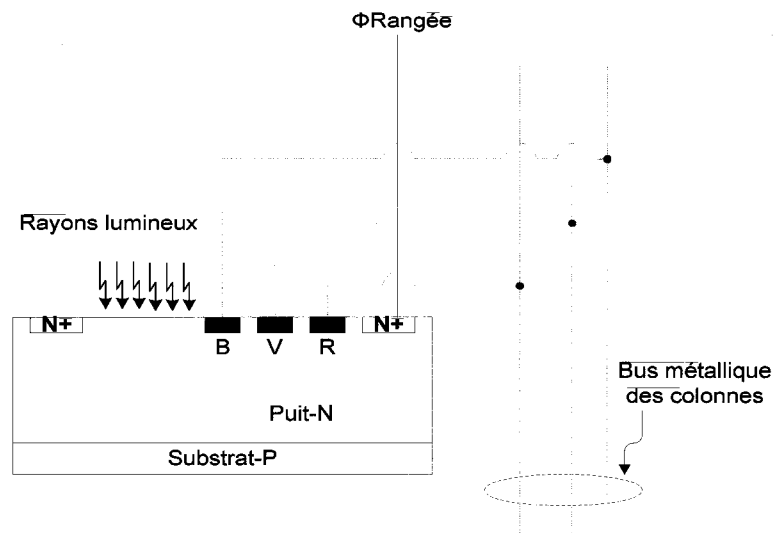


Figure 2-6: Architecture d'un pixel de la Matrice-II.

L'architecture du pixel utilisé pour réaliser la matrice-II est la même que celle de la matrice-I tel que l'illustre la figure 2-6, sauf que pour cette dernière, les trois électrodes de lecture sont connectées directement aux bus de colonnes sans passer par les transistors de sélection. Ceci permet de réduire l'impédance de la ligne de lecture des électrodes et le temps de stockage des charges sur les bus de colonnes, en lisant les colonnes de façon parallèle (tous les pixels de la même colonne sont lus en même temps).

c. Matrice -III

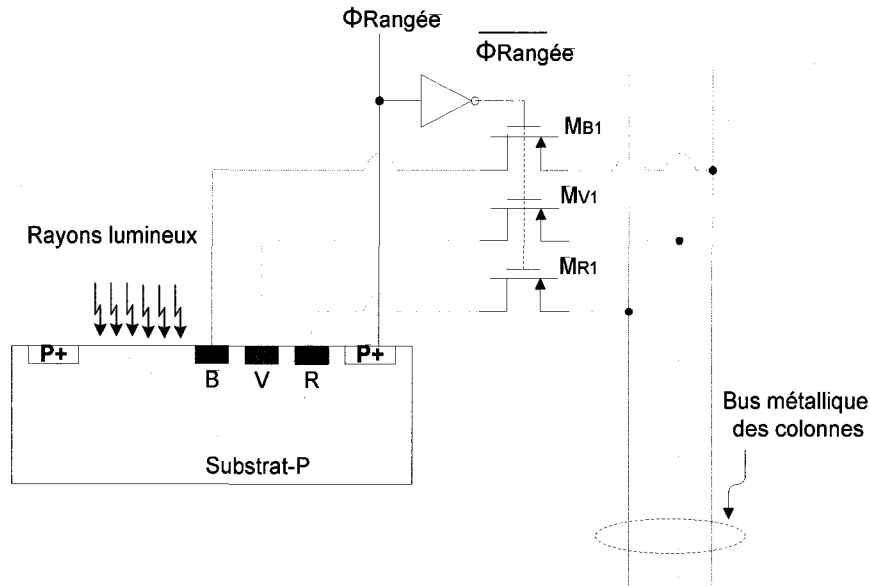


Figure 2-7: Architecture d'un pixel de la Matrice-III.

Le pixel utilisé dans la matrice-III de la figure 2-7, est l'opposé du pixel utilisé dans la matrice-I de la figure 2-5. Au lieu de collecter le courant des trous généré dans le puits-N tel que mentionnée dans la section *Matrice-I*, on collecte seulement les électrons générés dans le substrat-P. Effectivement, afin de former, avec le substrat-P, une diode polarisée en inverse, et ainsi éviter de collecter les trous libres majoritaires dans le substrat-P, les trois électrodes : bleue, verte, et rouge de lecture, sont formées à partir d'un dopage de type N (N+). La différence de potentiel produisant le champ électrique est appliquée aux électrodes de contact de type P (P+) grâce au signal sélecteur de rangée $\phi_{Rangée}$. Également, les trois triplets d'électrodes sont connectés aux bus de colonnes par les trois triplets d'électrodes de sélection MB1, MV1, et MR1, qui sont à leur tour activées par le signal $\phi_{Rangée}$.

2.4.2 Multiplexeur Analogique

Tel qu'il sera détaillé dans le chapitre suivant, le multiplexeur analogique est composé d'une série de trois transistors NMOS répétées vingt fois pour les vingt colonnes. Les drains de chaque triplet de transistors sont connectés sur les trois bus de la colonne correspondante, et leurs sources sont connectées sur les trois lignes de sortie. Les grilles de chaque triplet de transistors sont reliées ensemble, et sont connectées au signal sélecteur de colonne.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, le nouveau principe de détection de la lumière a été examiné. Les notions de la force de Lorentz ainsi que le principe de fonctionnement du pixel présenté dans la section 2.3 seront utiles dans les chapitres suivants de ce mémoire, lors de l'analyse du comportement du pixel. Ces notions théoriques ont abouti à la réalisation du capteur d'images prototype, dont l'architecture des pixels diffère d'une matrice à l'autre. Le chapitre suivant, sera consacré en détail à la lecture de ces trois différentes matrices des pixels.

CHAPITRE 3

Circuit de lecture

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, le circuit de lecture du capteur d'images est analysé en détail. Sa principale considération tient compte de l'architecture de ce prototype de capteur d'images, ainsi que de l'idée maîtresse de ce projet, qui est d'analyser et d'étudier le nouveau concept de détection de la lumière.

La topologie générale du capteur d'images est illustrée à la figure 3-1. Ce chapitre va étudier en détail chacune des trois parties qui composent cette topologie de la figure 3-1, à savoir la matrice des pixels, le circuit d'adressage, ainsi que les amplificateurs de sortie. La section 3.2 analyse l'architecture et le mode de fonctionnement de la matrice des pixels (la matrice-I). La section 3.3 discute le circuit d'adressage horizontal pour les colonnes, et vertical pour les rangées. Le mode d'opération, ainsi que le choix de composants est également analysé dans cette partie du chapitre. La section 3.4, traite le dernier module qui est de l'amplificateur de sortie, qui détecte et amplifie les petits signaux venant des pixels du capteur d'images. Les trois modules sont fusionnés ensemble dans la section 3.5, pour pouvoir l'interfacer avec la carte de capture *Corona-II* de la compagnie Matrox. Les résultats préliminaires qui valident le fonctionnement du circuit de lecture sont présentés et analysés en détail dans la section 3.6, où le circuit du capteur d'images est testé physiquement en l'illuminant avec un faisceau laser rouge.

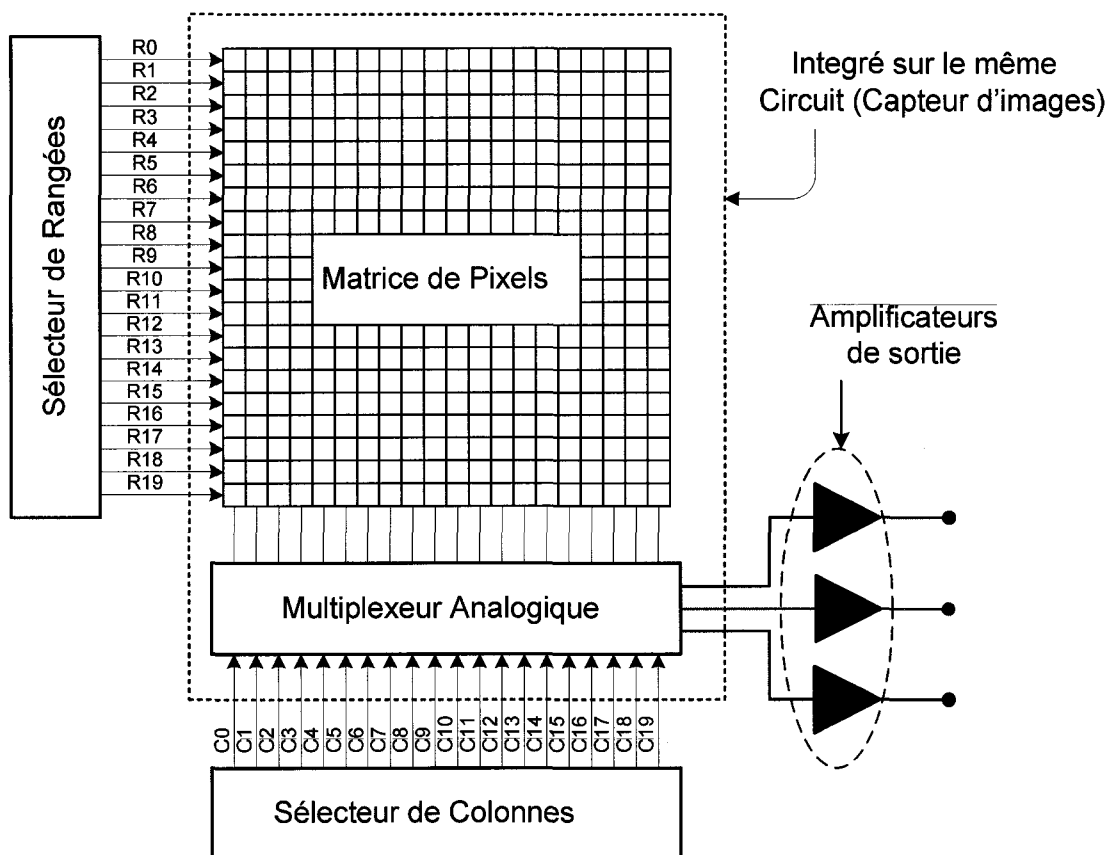


Figure 3-1: Topologie générale du capteur d'images de 20x20 pixels.

3.2 Matrice des pixels

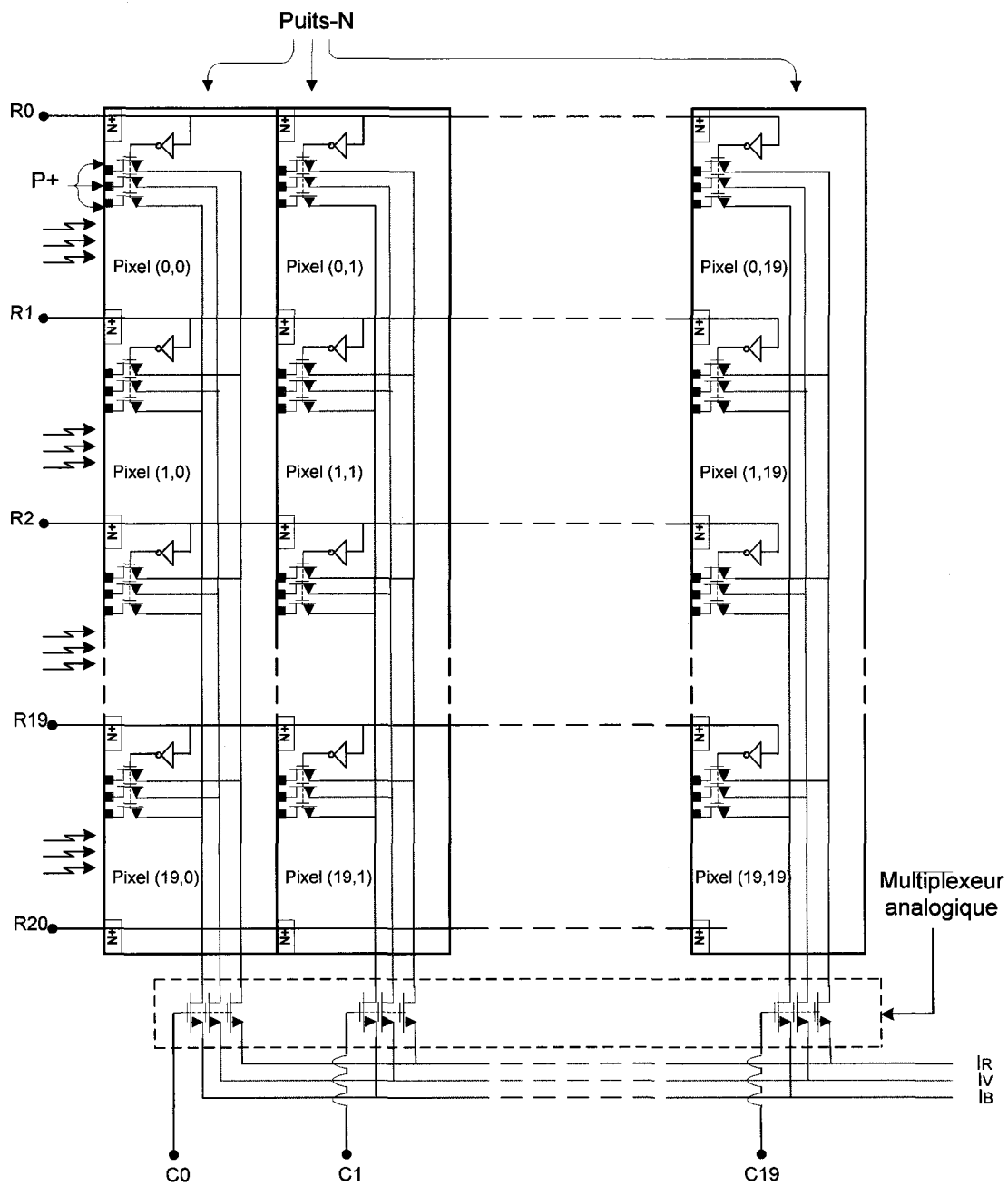


Figure 3-2: Architecture du capteur d'images prototype de la matrice-I

Tel que l'illustre la figure 3-2, le capteur d'images est composé d'une matrice de pixels, ainsi qu'un multiplexeur analogique. La différence entre les trois matrices de pixels est au niveau de l'architecture de leurs pixels. Une lecture pixel par pixel et une lecture parallèle dans le cas de la matrice-I et la matrice-II respectivement, et un substrat-P à la place des puits-N dans le cas de la matrice-III, mais le principe de polarisation et de lecture de chaque matrice de pixels est le même. Comme le montre la figure 3-2, nous considérons seulement les pixels de la matrice-I, où chaque pixel est composé de trois transistors NMOS de sélection, dont leurs drains sont connectés respectivement sur les trois électrodes de lecture P+. Les sources de ces transistors de sélection sont connectées sur les bus de sortie de leurs colonnes respectives. Quant à leurs grilles, elles sont toutes les trois reliées et connectées à travers un inverseur logique sur le bus logique sélecteur de leur rangée respective. Cet inverseur logique permet d'utiliser le même signal pour polariser le pixel (appliquer un champ électrique dans le pixel) et d'activer les transistors de sélection de rangée.

À la sortie de la matrice de pixels, les charges collectées par les bus de colonnes sont multiplexées et acheminées vers les trois bus de sortie par un multiplexeur analogique, composé à son tour par une série de transistors NMOS de sélection de colonnes. Chaque bus de sortie achemine seulement les charges associées à un seul type d'électrodes des différents pixels de la matrice. Le bus rouge achemine seulement les charges provenant des électrodes rouges de différents pixels de la matrice, le bus vert pour les charges venant des électrodes verts, et le bus bleu pour ceux des électrodes bleus. Chaque pixel de la matrice est accessible par ses coordonnées spatiales (en sélectionnant la rangée et la colonne d'intérêt).

3.2.1 Polarisation des pixels

La polarisation d'un pixel consiste à l'application d'un champ électrique responsable de la séparation et de l'accélération des charges créées par la radiation lumineuse dans le même pixel.

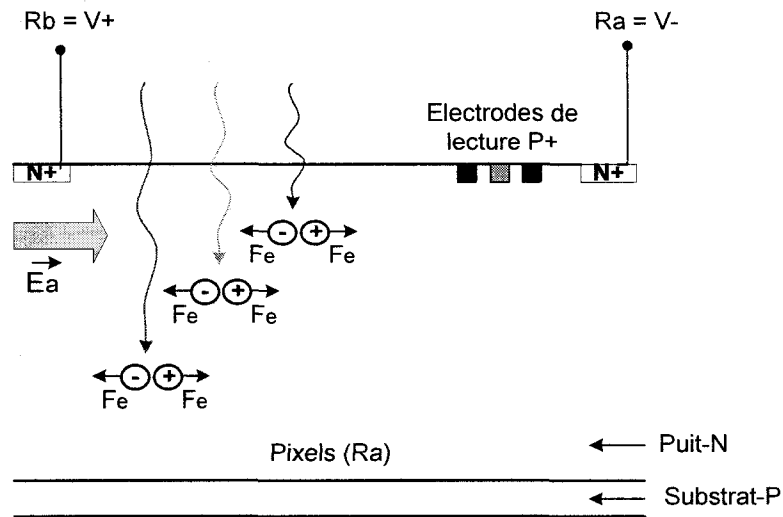


Figure 3-3: Polarisation d'une rangée de pixels de la matrice.

Tel qu'illustré sur la figure 3-3, il existe un champ électrique Ea dans les pixels de la rangée Ra , qui résulte d'une différence de potentiel appliquée aux bornes des électrodes de contact $N+$ des puits- N , par le biais des bus de rangées Ra et Rb . Étant une grandeur vectorielle, le champ électrique s'éloigne du potentiel le plus positif $V+$ et se dirige vers le potentiel le plus négatif $V-$. Lorsqu'une charge Q est placée en un point de l'espace où règne un champ électrique Ea , elle subit une force électrique Fe définie comme :

$$Fe = QEa \quad (3-1)$$

Le potentiel le plus positif est appliqué aux bornes de la rangée Rb , et le potentiel le plus négatif est appliqué aux bornes de la rangée qu'on veut activer Ra , afin d'orienter le champ électrique Ea dans la direction des trois électrodes de lecture. De cette façon, on oriente également les trous générés par la radiation lumineuse dans la direction de ces électrodes de lectures, tout en repoussant les charges négatives (les électrons) dans le

sens opposé. D'après la relation (3-1), si la charge Q est positive, la force qu'elle ressent a le même sens que le champ électrique, et si elle est négative, elle subit une force de sens opposé au champ électrique.

Il est également important de remarquer que ces trois électrodes de lecture formées à partir d'un dopage de type P (P^+), forment avec le puits-N, une diode polarisée en inverse, ce qui permet également d'éviter la collection des électrons libres et majoritaires qu'on retrouve dans le puits-N, et permet de collecter seulement les trous générés dans ces pixels de la rangée Ra par la radiation lumineuse, et qui leur parviennent grâce à cette force électrique Fe orientée dans le même sens que le champ électrique Ea (dans la direction des électrodes de lecture).

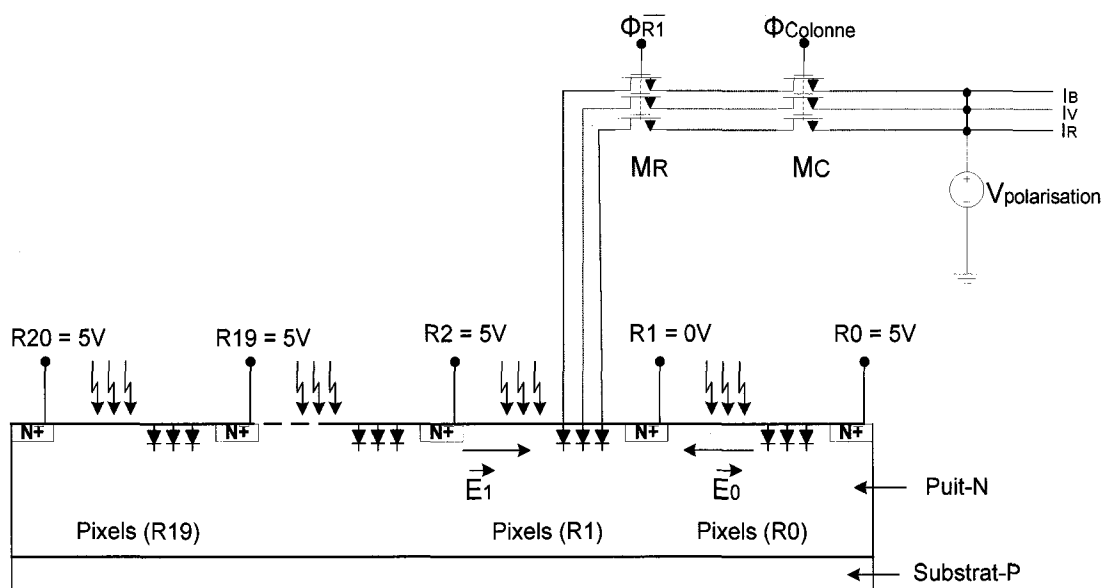


Figure 3-4: Chemin parcouru par un signal vidéo, du pixel jusqu'à l'amplificateur de sortie.

La figure 3-4 illustre le chemin parcouru par le signal, à partir du pixel jusqu'à la sortie du multiplexeur analogique, lorsqu'on sélectionne une rangée de la matrice. Les transistors NMOS MR et MC sont des transistors de sélection de rangées et de colonnes respectivement. Tel que mentionné dans les précédents paragraphes, le

potentiel le plus petit 0V est appliqué sur la rangée sélectionnée R1, et le potentiel le plus grand 5V est appliqué aux autres rangées non activées. Le champ électrique E1 résultant de la différence de potentiel entre R2 et R1, orienté dans la direction des électrodes de lecture des pixels activés de la rangée R1, polarise les pixels de cette rangée, alors que la différence de potentiel entre la rangée R0 et R1 génère également un autre champ électrique E0 dans les pixels de la rangée précédente R0. La présence de ce champ électrique E0 dans les pixels de la rangée R0 qui précèdent la rangée d'intérêt R1, ne présente aucun effet néfaste sur la polarisation, ou sur la lecture des pixels de cette rangée R1. Ce champ électrique E0 est orienté dans la mauvaise direction (orienté vers l'électrode de contact N+ de la rangée R1, au lieu d'être orienté vers les électrodes de lecture de la rangée R0), son effet est de repousser les charges positives générées dans les pixels de la rangée R0 par la radiation lumineuse, vers le contact N+ de la rangée R1. Et pour la lecture, les transistors NMOS de sélection des rangées sont activés par le même signal que celui qui polarise les rangées, mais à travers un inverseur logique tel que mentionné à la section 3.2. Dans ce cas, ce sont seulement les pixels de la rangée d'intérêt R1 qui sont activés.

Tel que montré à la figure 3-4, les trois diodes de lecture (bleue, verte et rouge) représentent la combinaison des électrodes de lecture formées à partir d'un dopage de type P (P+) et le puits-N, tel que mentionné dans la section précédente. En activant les transistors MR et MC pour la sélection d'une rangée et des colonnes respectivement, les diodes de lecture sont polarisées à l'inverse par la tension de polarisation $V_{\text{polarisation}}$. De cette façon, la lecture de la matrice de pixels se fait en appliquant la polarisation inverse des diodes, qui permet de collecter seulement les trous générés par la radiation lumineuse.

3.2.2 Méthode de balayage de la matrice des pixels

L'activation des transistors de sélection des rangées et ceux des colonnes ne suffit pas pour une bonne lecture de la matrice des pixels, mais, il faut également adopter une

stratégie d'adressage des rangées et des colonnes afin d'éviter de perdre ou de répéter certaines informations de l'image contenue dans la matrice de pixels.

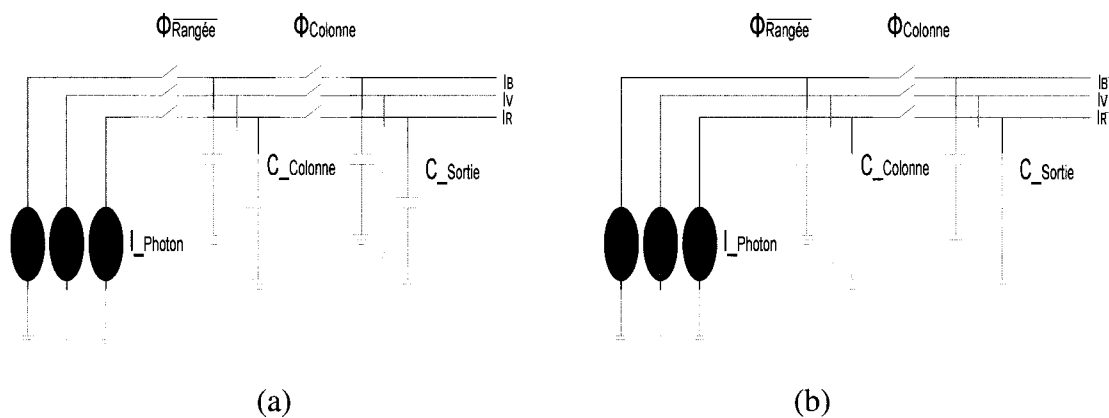


Figure 3-5 : Redistribution des charges lors de la lecture de la matrice des pixels. a) Aucune rangée ni colonne n'est sélectionnée. b) Lorsqu'une rangée de la matrice est sélectionnée.

La figure 3-5, permet de bien comprendre l'utilité de cette stratégie d'adressage. La figure 3-5(a), montre l'état des pixels avant l'activation d'une rangée de la matrice. Tel que illustré sur la figure 3-5(b), l'activation d'une rangée de la matrice, connectera tous les pixels de cette même rangée, sur leurs bus de colonnes respectives.

La bonne lecture consiste à accéder à chaque pixel de la matrice une seule fois, pour un seul balayage de la matrice. Les colonnes sont activées plus rapidement que les rangées.

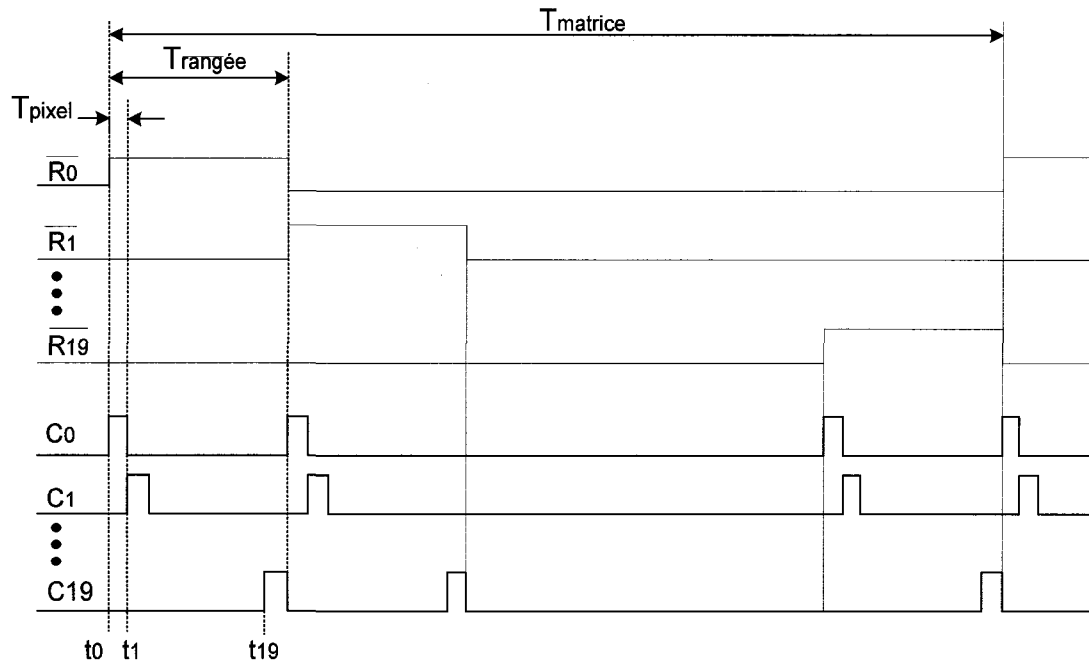


Figure 3-6: Diagramme temporel de la lecture de la matrice.

Cette stratégie de lecture est expliquée en examinant le diagramme temporel de la figure 3-6. Pendant la lecture complète d'une rangée de la matrice, chaque signal sélecteur de colonne, $C_0 - C_{19}$, est activé (niveau haut de 5V) successivement pour une durée d'un pixel T_{pixel} souvent associée à la fréquence de l'horloge

$$f_{Pixel} = \frac{1}{T_{Pixel}}$$

De la même façon, lors d'une lecture complète de la matrice des pixels, chaque signal sélecteur de rangées (signaux de polarisation de rangées inversés, car ils sont connectés avec les grilles des transistors sélecteurs de rangées via un inverseur logique) sont activés un à un, pour une durée d'une rangée $T_{rangée}$

$$T_{Rangée} = NT_{Pixel} \quad (3-2)$$

Avec N le nombre de pixels sur une rangée de la matrice (20 pixels dans notre cas). Le processus continu jusqu'à ce que tous les pixels de la matrice soient accédés.

3.3 Circuit d'adressage

Selon l'architecture de la matrice, on peut accéder aléatoirement à n'importe quel pixel de la matrice, en spécifiant seulement la coordonnée verticale (rangée), et la coordonnée horizontale (colonne) de la matrice. Mais tel qu'illustré dans la section 3.2 sur la figure 3-6, la stratégie de lecture adoptée suit un ordre logique. Ce mode de balayage continu « *progressive scan* » permet d'accéder à tous les pixels de la matrice en ordre et de bien identifier et localiser chaque pixel de la matrice dans le plan de l'image lue.

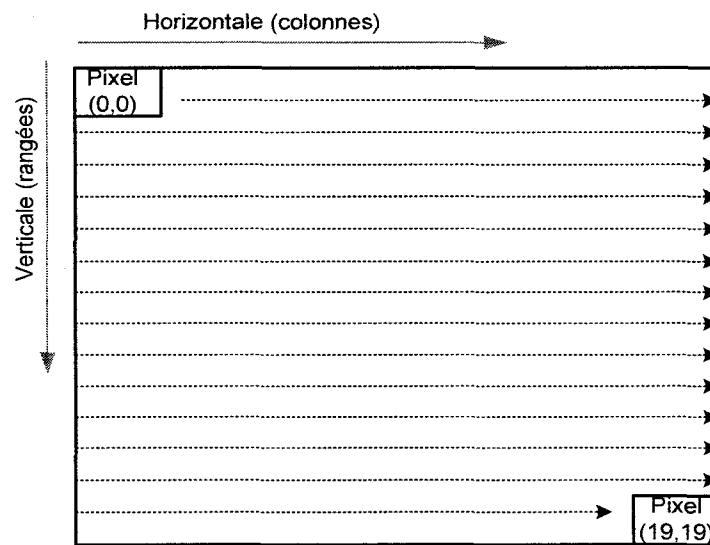


Figure 3-7: Méthode de lecture continue « progressive scan ».

La figure 3-7 montre bien cet ordre d'accès à chaque pixel de la matrice. Le premier pixel à être lu est celui placé en haut à gauche de la matrice *pixel (0,0)*, suivi immédiatement avec celui placé à sa droite sur la même rangée, et ainsi de suite jusqu'à la fin de la première rangée. La deuxième rangée suit et est lue de la même façon que sa précédente (la première rangée). Ce mode de balayage continue à travers toute la matrice, jusqu'à ce que le dernier pixel de la dernière rangée *pixel (19,19)* soit lu. Et ainsi le processus de lecture de la matrice se répète à partir du coin supérieur gauche de la matrice *pixel (0,0)*, et ainsi de suite.

Plusieurs circuits numériques capables d'accomplir cette tâche de balayage continu existent, et peuvent être facilement intégrés avec le capteur d'images. Notamment, les registres numériques à décalage pour le bloc sélecteur de colonnes, ainsi que celui de sélecteur de rangée, peuvent être implémentés facilement et optimisés avec les portes logiques dynamiques. Néanmoins, vu que l'objectif primordial de ce projet vise avant tout à étudier le nouveau principe de détection de la lumière, le circuit d'adressage n'est pas intégré sur le même circuit que le capteur d'images, mais il est réalisé à l'extérieur de la puce. De cette façon, en isolant la matrice de pixels qu'on veut étudier, on évite d'introduire du bruit de commutation provenant d'un circuit d'adressage intégré.

Vu son accessibilité et sa flexibilité, le circuit d'Actel de la famille *42MX FPGA 84 pins*, est utilisé pour implémenter le circuit sélecteur de colonnes, le circuit sélecteur de rangées et pour générer les signaux de control afin de pouvoir interfacier le capteur d'images avec la carte de capture d'images. L'interfaçage du capteur d'images avec la carte de capture qui sera analysée plus en détail dans la section suivante 3.5. Elle permet de suivre et d'étudier le comportement du capteur d'images en temps réel.

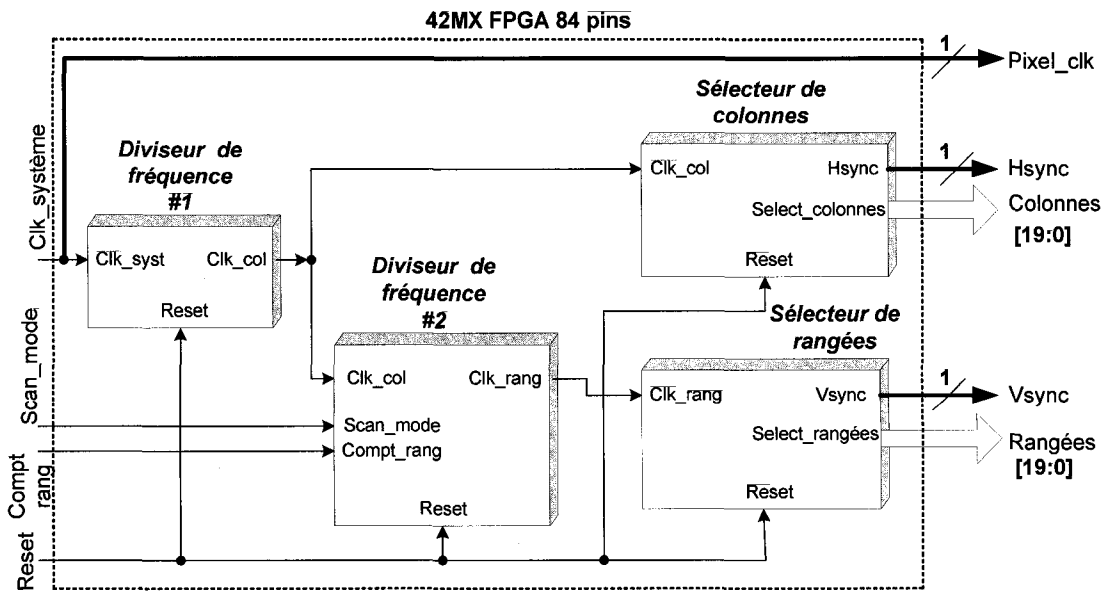


Figure 3-8: Schéma bloc du circuit FPGA.

La figure 3-8, montre les différents blocs qui composent la FPGA. Ses sorties comptent un bus de vingt signaux parallèles pour adresser les vingt colonnes du capteur d'images, également un autre bus de vingt signaux parallèles pour les vingt rangées du capteur, ainsi que les trois signaux supplémentaires (*Pixel_clk*, *Hsync*, et *Vsync*) nécessaires à la synchronisation, lors de l'interfaçage du capteur d'images avec la carte de capture.

Signaux d'entrées

Parmi les signaux d'entrées de la FPGA, nous avons :

- *Clk_système* : l'horloge générale du FPGA, qui est générée par une onde carrée du générateur de fonction,
- *Reset* : un signal asynchrone de remise à zéro. Lors qu'il est au niveau bas 0V, aucun pixel de la matrice n'est activé. Les signaux sélecteurs de colonnes sont mis à zéro 0V, et ainsi bloquent tous les transistors NMOS de sélection de colonnes, alors que les signaux sélecteurs de rangées sont au contraire mis à 5V, afin de bloquer également les transistors NMOS de sélection de rangées, car ces derniers sont connectés aux bus des rangées à travers un inverseur logique. Le balayage et la lecture de la matrice commencent lorsque le signal de *reset* est mis au niveau haut 5V.
- *Scan_mode* : ce signal lorsqu'il est à 5V, permet de parcourir la matrice en mode automatique. C'est-à-dire, une lecture continue, un pixel à près l'autre jusqu'à la fin de la matrice, et ainsi de suite. Mais lorsqu'il est au niveau bas 0V, le balayage de la matrice se fait manuellement, grâce au quatrième signal d'entrée *Compt_rang*.
- *Compt_rang* : ce signal compteur de rangée, permet d'activer seulement une rangée d'intérêt, et ainsi permet de visualiser seulement un pixel particulier de toute la matrice.

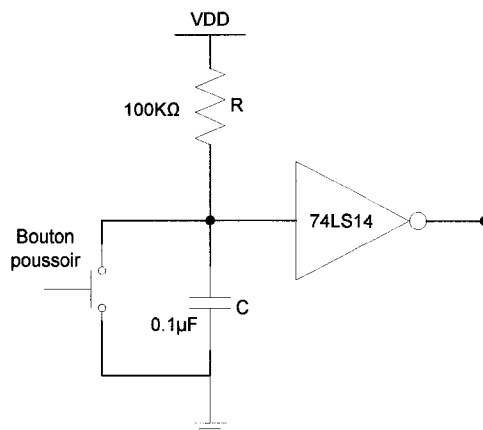


Figure 3-9: Circuit anti-rebond.

Lorsqu'un bouton poussoir est actionné, il est parfois difficile d'obtenir un contact franc et instantané à l'intérieur d'un commutateur. C'est un phénomène dit de rebond. Afin d'y remédier, le circuit anti-rebond de la figure 3-9 est utilisé pour les boutons poussoirs des signaux d'entrées, *Reset* et *Compt-rang*. Il repose sur une combinaison simple d'un filtre RC pour éliminer les rebonds (signaux à variation rapide), et un circuit logique 74LS14 qui est un détecteur de seuil, afin de livrer les bons niveaux logiques en sortie.

Pixel_clk

Ce signal correspond à l'horloge du FPGA *clk_système*. Il est envoyé à la carte de capture de l'ordinateur, et il est associé à la fréquence d'affichage sur l'écran de l'ordinateur. Il indique le début d'un pixel de l'écran de l'ordinateur à afficher. Il est à noter que la carte de capture du système (utilisée pour l'affichage de l'image à l'ordinateur) est celle incluse dans la carte de capture *Matrox corona-I*.

Diviseur de fréquence #1

Tel que mentionné dans la section précédente, l'horloge *clk_col* du module sélecteur de colonnes, est associé à la fréquence de pixel de la matrice du capteur d'images. Or, si

cette horloge *clk_col* a la même fréquence que le signal *pixel_clk* associé à la fréquence d'affichage sur l'écran de l'ordinateur, un pixel de la matrice du capteur d'images équivaut à un pixel sur l'écran d'affichage de l'ordinateur, trop petit à visualiser et à suivre à temps réel lors de l'expérimentation. Ce premier bloc de diviseur de fréquences pare à ce problème. Il reçoit l'horloge générale du FPGA *clk_système* qui correspond à celui d'affichage sur l'écran de l'ordinateur *pixel_clk*, le retarde et l'associe à l'horloge *clk_col* du module sélecteur de colonnes. L'horloge d'affichage sur l'écran de l'ordinateur, *pixel_clk*, étant dix fois plus rapide que celui du module sélecteur de colonnes, *clk_col*, un pixel de la matrice du capteur d'images sera répété ou affiché dix fois sur l'écran de l'ordinateur, avant que le pixel suivant de la même rangée de la matrice du capteur soit activé. Autrement dit, un pixel de la matrice du capteur d'images équivaut à dix pixels horizontaux de l'écran de l'ordinateur. Pour les 20 pixels qui composent une rangée de la matrice du capteur d'images, ils seront affichés sur 200 pixels horizontaux de l'écran de l'ordinateur.

Diviseur de fréquence #2

Ce deuxième module diviseur de fréquences opère de la même manière que le premier, mais celui-ci crée un retard vertical pour le balayage de la matrice du capteur. Il reçoit l'horloge *clk_col* du module sélecteur de colonnes, le retarde également et l'associe à l'horloge *clk_rang* du module sélecteur de rangées. Ceci permet au signal *pixel_clk*, qui contrôle la vitesse d'affichage sur l'écran de l'ordinateur, d'afficher verticalement, une rangée de la matrice du capteur, dix fois, avant d'activer une autre rangée du capteur. De cette façon, une rangée du capteur équivaut aux dix rangées ou dix pixels verticaux de l'écran d'ordinateur. Et pour les 20 pixels verticaux qui composent la matrice du capteur d'images, ils seront également affichés sur 200 pixels de l'écran d'ordinateur.

Malgré la perte de la résolution, l'effet combiné de ces deux modules de diviseurs de fréquences sur l'affichage, permet de visualiser un pixel du capteur d'images sur 10

pixels par 10 pixels de l'écran. Cela permet d'avoir une image assez visible et facile à suivre même situé à une bonne distance de l'ordinateur.

Sélecteur de colonnes

Le module sélecteur de colonnes génère deux types de signaux :

- *Hsync* : un signal de synchronisation horizontal. Il est envoyé à la carte de capture de l'ordinateur pour lui indiquer la fin et le début d'une rangée de la matrice de capteur d'images. Il est actif sur niveau haut, seulement lors de la lecture d'une rangée.
- *Colonnes* : ce sont des signaux sélecteurs de colonnes tel que mentionné sur la figure 3-6. Lors de la lecture de la matrice des pixels du capteur, ces signaux sélecteurs de colonnes passent successivement d'un niveau bas (pour désactiver la colonne déjà lue), à un niveau *haut* pour lire cette colonne, jusqu'à la fin d'une rangée, avant de recommencer la lecture de la deuxième rangée, et ainsi de suite. Ces sorties du FPGA sont directement connectées sur les grilles des transistors de sélection de colonnes sans aucun autre module intermédiaire, car il s'agit d'activer et de désactiver un réseau de commutateurs composés de transistors NMOS, avec la seule condition d'activation : $V_G - V_{polarisation} \geq V_{th}$, avec $V_{polarisation}$ égale à 0V pour la polarisation inverse de la diode (résultat de l'électrode P+ avec le puits-N).

Sélecteur de rangées

- *Vsync* : un signal de synchronisation vertical. Il est envoyé aussi à la carte de capture de l'ordinateur, afin que la carte reconnaisse la fin et le début de la matrice de pixels du capteur d'images. Comme celui de la synchronisation horizontale, il est aussi activé au niveau haut lors de la lecture d'une matrice, et

au niveau bas lors du passage d'un balayage complet de la matrice à l'autre. Il reste au niveau bas pour une durée d'une rangée.

- *Rangées* : tel que l'illustre également la figure 3-6, ces signaux sélecteurs de rangées, passent successivement de niveau haut à un niveau bas pour désactiver et activer respectivement les rangées de la matrice des pixels. Mais, contrairement aux précédents signaux sélecteurs de colonnes, une attention particulière est nécessaire lors de la connexion des sorties du FPGA, et les bus de rangées de la matrice du capteur, afin d'éviter d'endommager et d'assurer le bon fonctionnement du circuit de FPGA. Cette contrainte supplémentaire est décrite plus loin.

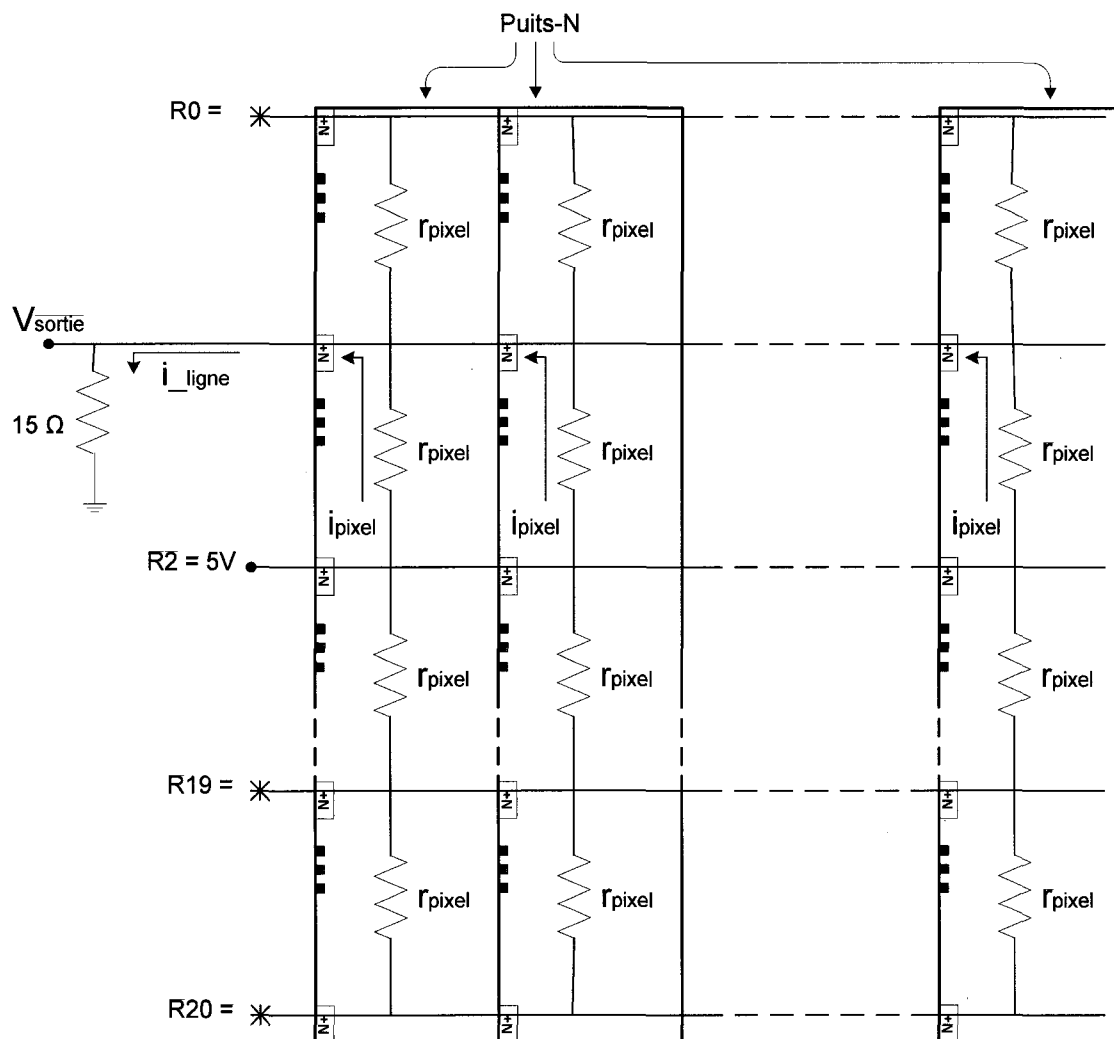


Figure 3-10: Mesure du courant de polarisation, ainsi que de la résistance d'un pixel de la matrice.

La figure 3-10, montre l'équivalent électrique de la matrice des pixels du capteur d'images. Les différents pixels de la matrice sont représentés par les différentes résistances de leur puits-N. La tension du niveau haut 5V est appliquée sur une seule rangée de la matrice R2, au moment où les autres rangées sont laissées flottantes. Une petite résistance de lecture de 15Ω est connectée à la sortie de la rangée R1, et on obtient les mesures suivantes :

$$V_{\text{Sortie}} = 0.4V$$

Tel que montré sur la figure 3-10, la différence de potentiel entre la rangée R2, et la rangée sélectionnée R1, résulte d'un courant de polarisation i_{pixel} qui circule dans chaque pixel de la rangée sélectionnée R1. Tous ces courants des pixels de la rangée R1 convergent sur le même bus de cette rangée R1, et leur addition forme un courant total $i_{rangée}$, exprimé comme suit :

$$i_{Rangée} = \frac{0.4V}{15\Omega}$$

$$i_{Rangée} = 27mA \quad (3-3)$$

Pour les vingt pixels d'une rangée, le courant de polarisation de chaque pixel i_{pixel} est de:

$$i_{Pixel} = \frac{27mA}{20}$$

$$i_{Pixel} = 1.35mA \quad (3-4)$$

D'où la résistance du puits-N de chaque pixel est de l'ordre de :

$$r_{Pixel} = \frac{5V-0.4V}{1.35mA}$$

$$r_{Pixel} = 3.4K\Omega \quad (3-5)$$

Les vingt pixels qui composent une rangée de la matrice correspondent aux vingt différents puits-N en parallèles. Donc les vingt résistances d'un pixel r_{pixel} montées en parallèles ont une résistance équivalente de:

$$r_{Rangée} = \frac{r_{Pixel}}{20}$$

$$r_{Rangée} = 170\Omega \quad (3-6)$$

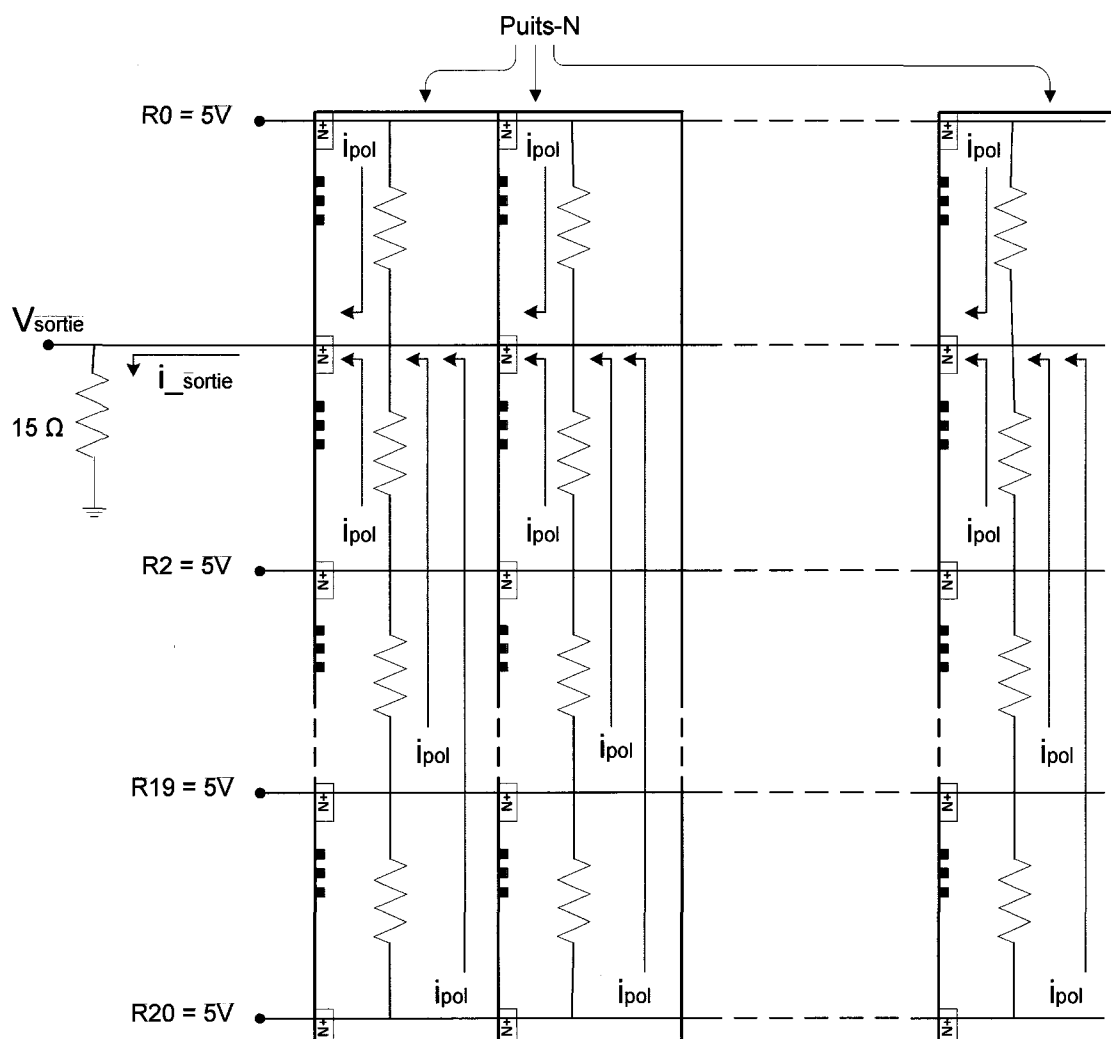


Figure 3-11: Mesure du courant de polarisation de toute la matrice, selon la stratégie de polarisation adoptée.

La figure 3-11, montre également l'équivalent électrique de la matrice du capteur d'images, mais cette fois polarisée tel que mentionné dans les paragraphes précédents (voir figure 3-4). Le potentiel le plus petit est appliqué sur la rangée sélectionnée R1, et le potentiel le plus grand 5V est appliqué aux autres rangées non activées. Également, une petite résistance de mesure de 15Ω est connectée sur la rangée sélectionnée R1, afin d'estimer le courant total absorbé ou fourni par le circuit sélecteur de rangées FPGA. Comme le montre la figure 3-11, le courant total est une superposition de différents

courants de polarisation i_{pol} , qui résultent de la différence de potentiel entre chaque rangée non activée 5V, et la rangée sélectionnée R1. On a les mesures suivantes :

$$V_{Sortie} = 4.9V$$

$$i_{Sortie} = \frac{4.9V}{15\Omega}$$

$$i_{Sortie} = 327mA \quad (3-7)$$

D'après la relation (3-6, et 3-7), plus la taille de la matrice (la résolution) augmente, plus la résistance équivalente d'une rangée devient petite. Selon la loi d'Ohm de l'équation (3-2), le courant dû à la polarisation peut être diminué en baissant le niveau haut, 5V, de la tension d'alimentation. Étant donné que le champ électrique minimum nécessaire au bon fonctionnement de ce nouveau concept de détection de la lumière, ne sera connu que grâce aux résultats expérimentaux de ce capteur prototype, et que la technologie de la compagnie *AMIS* utilisée pour la conception de ce prototype peut supporter des courants aussi importants que $327mA$, le niveau haut de la tension de polarisation est maintenu à 5V afin d'avoir un champ électrique assez important dans les pixels sous test. L'objectif primordial de ce projet est de valider et d'étudier le nouveau concept, les résultats expérimentaux seront tenus en considération lors de la réalisation d'un deuxième circuit intégré du capteur d'images.

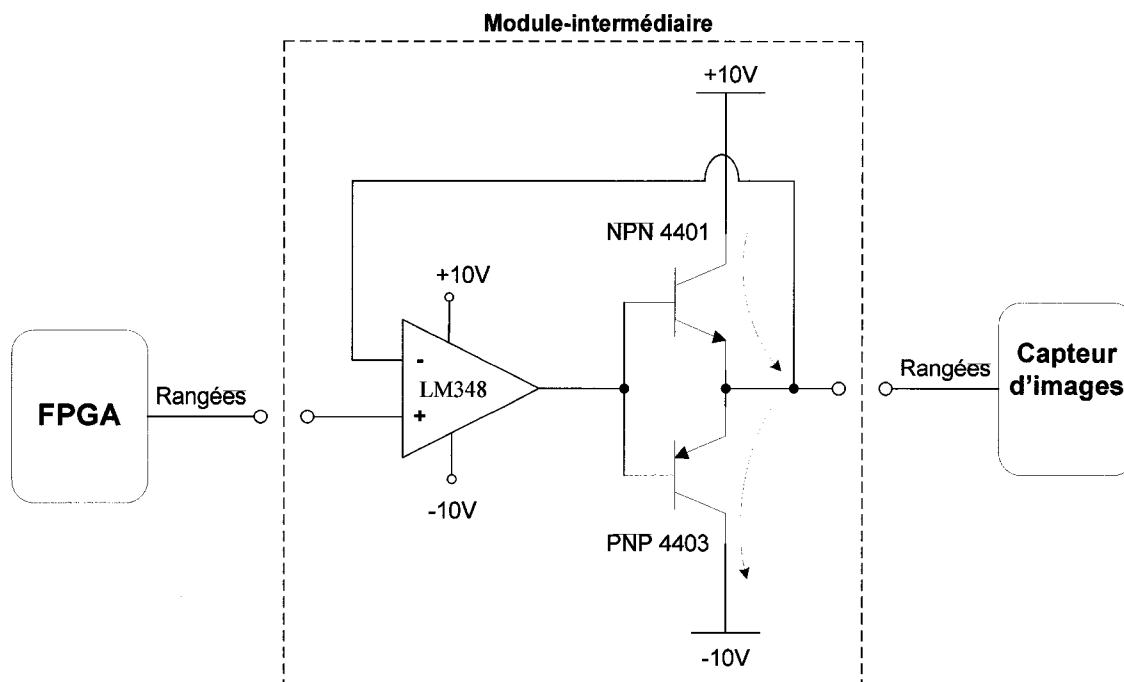


Figure 3-12: Circuit intermédiaire entre les sorties du FPGA et les bus de rangées du capteur d'images.

Le circuit d'Actel de la famille *42MX FPGA 84 pins* utilisé pour générer les signaux sélecteurs de rangées, peut fournir et absorber $20mA$ maximum, à une charge connectée directement sur ses sorties. Il est conçu pour alimenter des charges qui ont une grande impédance d'entrée, et qui ont besoin d'une quantité de courant petite. Or, pour que ce circuit de FPGA alimente ce capteur d'images, il faut un autre module intermédiaire, capable de fournir et d'absorber un courant supérieur à $327mA$, pour générer le champ électrique des pixels.

La figure 3-12, illustre ce module intermédiaire. Il est composé d'un amplificateur opérationnel, LM348, ainsi que deux transistors bipolaires NPN4401 et PNP4403 connectés en « *push-pull* ». Le signal de commande provenant du FPGA est appliqué à l'entrée positive de l'amplificateur, alors que l'entrée négative de l'amplificateur est connectée ensemble avec les émetteurs des transistors bipolaires et le plot menant à une rangée. La sortie de l'amplificateur est connectée aux deux bases des transistors.

Lorsque le signal de commande provenant du FPGA est appliqué à l'entrée positive de l'amplificateur, la sortie de l'amplificateur appliquera une tension de polarisation nécessaire aux deux bases des transistors, et ces derniers vont charger ou décharger le nœud de sortie de façon à obtenir en sortie la même tension qu'à l'entrée $V(+)$ de l'ampli alimenté par le FPGA. De cette façon, le circuit de FPGA est protégé du courant venant du capteur d'images, car il est complètement isolé du capteur par l'amplificateur opérationnel. De la même façon, la polarisation des bases des transistors via l'amplificateur en rétroaction négative permet de protéger ces deux transistors, car l'amplificateur appliquera aux deux bases, seulement une tension de polarisation nécessaire à la charge ou à la décharge d'une rangée. Le module intermédiaire est utilisé entre chaque sortie sélectrice de rangée du FPGA, et le plot de rangée du capteur d'images. Pour les vingt rangées du capteur, on aura besoin de vingt modules intermédiaires. On utilise le circuit intégré LM348 qui contient quatre amplificateurs opérationnels, et le circuit intégré MMDT4413, qui contient deux transistors bipolaires, un NPN et un PNP.

3.4 Amplificateur de sortie

Le dernier module de la figure 3-1 est l'amplificateur de sortie. Ce module est nécessaire pour chaque bus de sortie (le bus des électrodes bleues, les électrodes vertes, et pour les électrodes rouges) du multiplexeur analogique, afin de détecter et d'amplifier les petits signaux contenus dans les différents pixels du capteur. Dans cette section, le circuit utilisé pour réaliser ce module est expliqué.

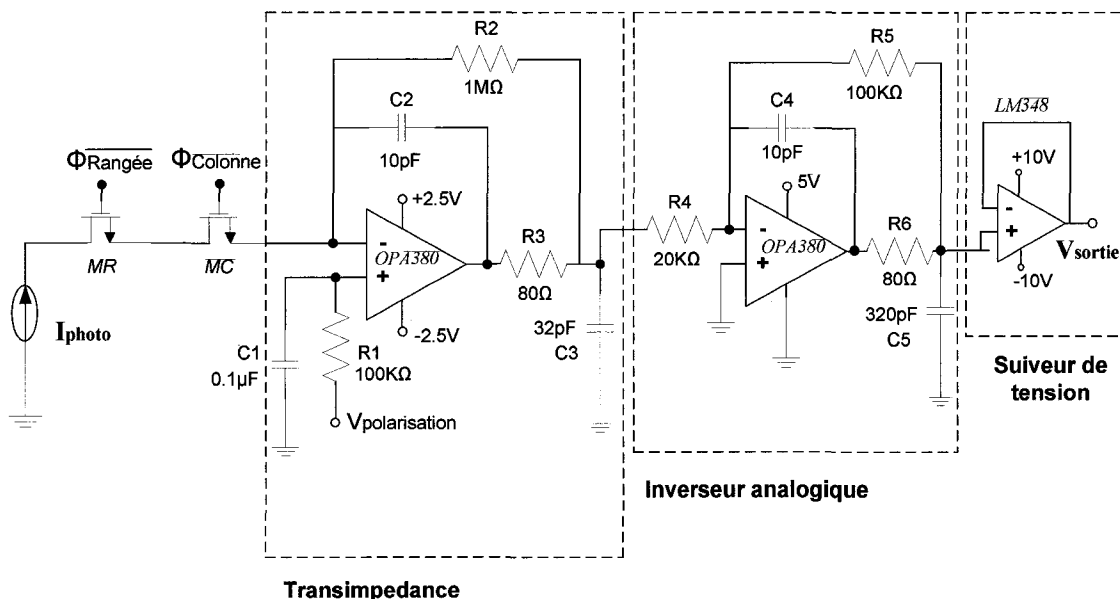


Figure 3-13: Modules qui composent l'amplificateur de sortie.

La figure 3-13 illustre le chemin parcouru par le signal, à partir du pixel, jusqu'à la sortie du module amplificateur de sortie. Ce module d'amplificateur de sortie est composé de trois sous-modules, notamment, un amplificateur de transimpédance, un inverseur analogique ainsi qu'un suiveur de tension. C'est dans le but d'isoler le capteur d'images aux effets inattendus provenant des autres modules, que ces trois modules composant l'amplificateur de sortie sont également réalisés à l'extérieur du capteur.

Amplificateur transimpédance

L'amplificateur de transimpédance constitue le premier module de l'étage d'amplificateur de sortie, responsable de la lecture des charges provenant de différents pixels de la matrice du capteur et de la polarisation inverse des diodes simultanément. Tel que montré sur la figure 3-13, il est réalisé par un circuit intégré discret d'un amplificateur opérationnel OPA380. Avec un courant de polarisation d'entrée extrêmement petit 3pA et bruit de courant et de tension très faible, font en sorte que cet amplificateur opérationnel soit le choix pour la réalisation du circuit de l'amplificateur

de transimpédance. Les transistors MR et MC, sont des transistors de sélection de rangées et de colonnes respectivement. La matrice est lue tel qu'illustré sur la figure 3-6. Premièrement une rangée est sélectionnée, ainsi injectant les charges sur les bus de colonnes. Et puis, le transistor de sélection de colonnes MC est activé, permettant les charges provenant d'un pixel particulier de la matrice, de traverser et d'être converti par la résistance de rétroaction R2, en une tension proportionnelle à ces charges. En même temps, la diode se charge à la tension de polarisation $V_{polarisation}$ de l'entrée positive de l'amplificateur OPA380, par le biais de la masse virtuelle. Un réseau RC composé de R1 et C1 est utilisé pour filtrer le bruit de polarisation. La tension de polarisation est de 0V, pour une polarisation inverse des diodes, et sert aussi de tension de référence à la sortie lorsqu'aucun pixel de la matrice n'est activé.

Malgré que le bruit généré à la sortie de l'amplificateur de transimpédance par la résistance R2 augmente avec la valeur de cette résistance, le rapport signal - bruit est meilleur lorsqu'une grande partie du gain visé est fixé par le premier module (amplificateur transimpédance). Ceci est dû au fait que la densité spectrale de bruit produit par la résistance R2, augmente avec la racine carrée de cette résistance, alors que le signal augmente linéairement avec la valeur de la résistance. Une valeur de $1M\Omega$ de la résistance de rétroaction R2 a été trouvée suffisante pour ne pas saturer la sortie et fournir de bons résultats. La capacité de rétroaction C2 est utilisée pour limiter la bande passante de l'amplificateur, car le bruit total augmente avec la bande passante. En ajoutant un filtre formé par R3 et C3, on introduit un deuxième pôle, et par conséquent, on réduit le bruit à la sortie de l'amplificateur, avec une fréquence de coupure à -3dB de :

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2R_3C_2C_3}}$$

$$f_{-3dB} \approx 1MHz$$

La sortie de ce module d'amplificateur de transimpédance est une série de différents niveaux de tensions, dont leurs amplitudes dépendent de la quantité de charges de

chaque pixel de la matrice du capteur d'images ayant traversé la résistance de rétroaction R2.

Inverseur analogique

Étant donnée le sens du courant des pixels I_{photon} , la sortie de l'amplificateur de transimpédance est une tension négative. L'étage suivante est un simple amplificateur inverseur, afin d'inverser et d'augmenter le gain du signal, pour l'adapter à un niveau acceptable par la carte de capture d'images lors de l'interfaçage. Les valeurs des résistances R4 et R5 sont choisies seulement pour appliquer un gain de 5V/V au signal. L'amplificateur opérationnel OPA380, est employé encore une fois pour sa qualité de faible bruit à son entrée.

Suiveur de tension

Le module suiveur est utilisé pour pouvoir alimenter l'impédance d'entrée faible de la carte de capture.

3.5 Interfaçage avec ordinateur

Après avoir réalisé le circuit de lecture, l'interfaçage du capteur d'images avec l'ordinateur s'avère nécessaire, afin d'afficher les données de l'image, et ainsi étudier le comportement du capteur. Ceci est accompli à l'aide de la carte de capture de la compagnie Matrox *corona-II* installée dans l'ordinateur.

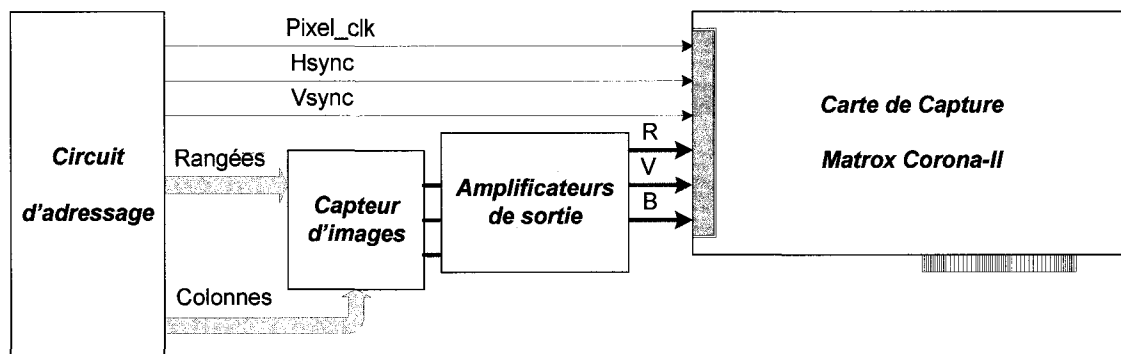


Figure 3-14: Schéma d'interfaçage de la carte de capture de l'ordinateur et les différents modules du capteur d'images.

La figure 3-14, illustre l'interaction entre la carte de capture et les différents modules agissant sur le capteur d'images. Tel que montré sur la figure 3-14, cette interaction est en mode dite esclave, car la carte d'acquisition reçoit tous les signaux de control de la part du module du circuit d'adressage.

Tel que mentionné à la section précédente, le mode de balayage continu est celui choisi pour lire la matrice. La carte de capture n'a besoin que de trois signaux de synchronisation, ainsi que le signal vidéo contenant l'information sur l'image à afficher. Ces trois signaux de synchronisation sont : *Pixel_clk*, *Hsync* et *Vsync*, tel qu'expliqué précédemment dans la section 3.3. Une attention particulière est portée sur la bonne synchronisation de ces trois signaux de synchronisation car le moindre mouvement d'un de ces trois signaux va se refléter dans l'image affichée et ainsi il devient impossible d'avoir une image statique facile à analyser.

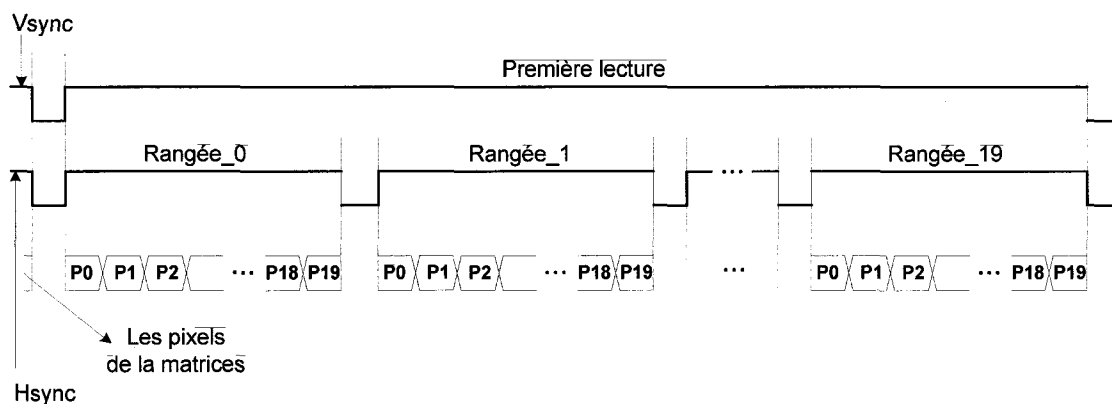


Figure 3-15: Diagramme de synchronisation de données entre la carte de capture et les modules du capteur d'images.

Tel que montré sur la figure 3-15, d'abord le signal de synchronisation verticale V_{sync} est activé par un niveau haut pour indiquer le commencement de la lecture de la matrice des pixels, et puis celui de synchronisation horizontale suit, afin d'afficher les rangées une à une. Lorsque le signal de synchronisation horizontale est activé à un niveau haut, la carte reçoit et affiche les vingt pixels d'une rangée, et lors que ce signal de synchronisation horizontal passe au niveau bas, la carte passe à l'affichage des pixels d'une rangée suivante, ainsi de suite, jusqu'à la fin de la matrice lorsque celui de synchronisation verticale passe à son niveau bas pour indiquer la fin de la matrice.

3.5.1 Carte de capture « *Matrox corona-II* »

Corona-II est une carte d'acquisition et graphique d'images de la compagnie Matrox. Elle peut recevoir une image dans un format standard ou non-standard, provenant de différents types de cameras. Soit pour une caméra monochrome, ou une caméra à couleurs primaires (rouge, verte, et bleue).

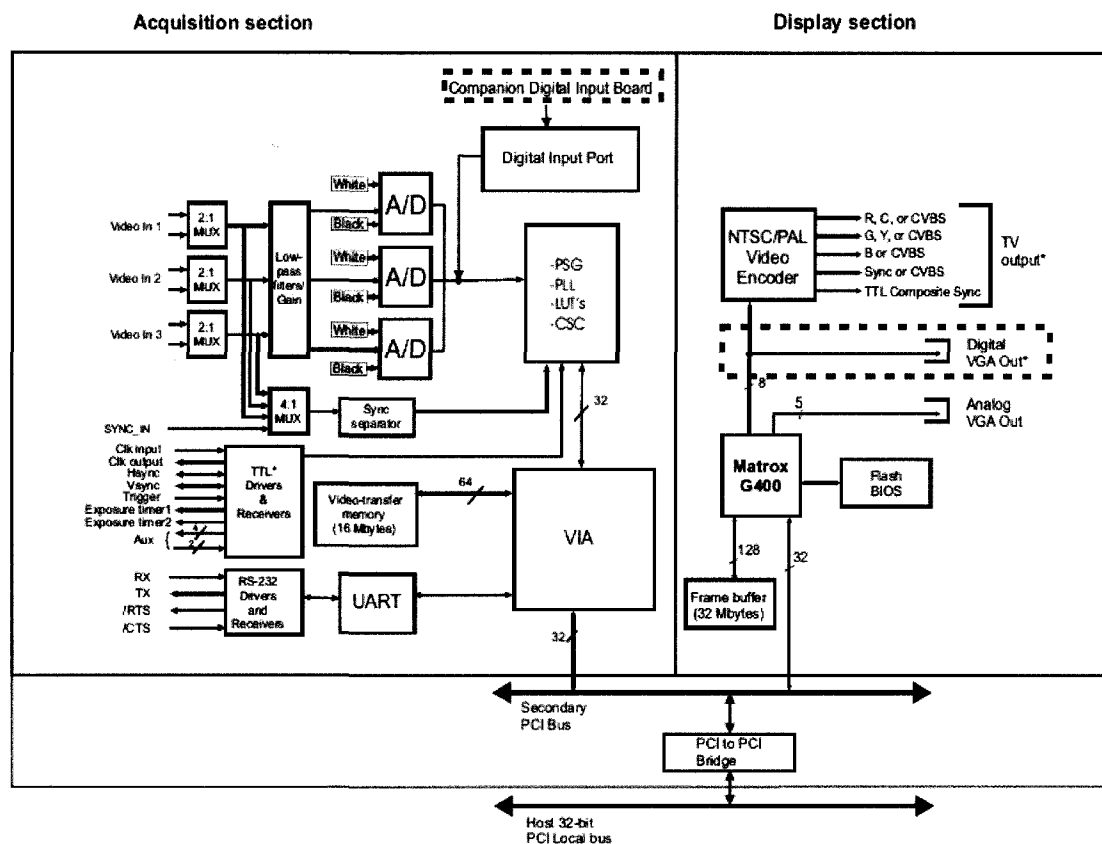


Figure 3-16: Schéma de l'architecture interne de la carte de capture Corona-II.

Tel qu'on peut le voir sur la figure 3-16, la carte comprend le module d'acquisition et le module d'affichage (graphique). Le module d'acquisition comprend trois entrées analogiques, *video in 1*, *video in 2*, *video in 3*, pour l'acquisition de trois signaux vidéo analogique couleur : rouge, vert et bleu respectivement. Donc, les trois signaux vidéo de sortie du capteur sont envoyés directement à ces trois entrées de la carte graphique, dont la tension d'entrée de saturation est de 800mV. Quant aux signaux de synchronisation de la carte, *Clk input*, *Hsync*, et *Vsync*, ils sont connectés directement avec les trois signaux de synchronisation générés par le circuit d'adressage, *Pixel_clk*, *Hsync*, et *Vsync* respectivement. Tel que montré sur la figure 3-14, il n'y aucun module intermédiaire de conversion des signaux nécessaires, car le module d'acquisition de la carte est capable de recevoir les niveaux logique standards *TTL*, avec 2V minimum pour un niveau haut, et 0.8V maximum pour un niveau bas. Les signaux *Hsync* et *Vsync* de la carte, peuvent

être configurés comme les signaux d'entrée ou de sortie dépendamment qu'on veut contrôler la carte de capture ou le capteur d'images. Dans ce projet, ils sont configurés comme signaux d'entrées, car la carte de capture est contrôlée par le circuit d'adressage. Cette configuration se fait au niveau d'un fichier de control dit *DCF* (Digitizer Configuration Format) tel qu'il sera détaillé à la section suivante. La carte de capture et le reste du circuit sont connectés par le câble COR2-44-TO-13 de Matrox, dont les signaux vidéo sont blindés par des câbles coaxiaux.

3.5.2 MIL et Intellicam

Après avoir interconnecté le capteur d'images et la carte de capture, il faut opérer et contrôler cette carte. Ceci se fait à l'aide des outils de Matrox capables de supporter la carte *Corona-II*, dont *MIL* (*Matrox Image Library*) et *l'Intellicam*. Cette première est une librairie de développement de Matrox, supporté par l'environnement du langage de programmation C++, qui comprend une liste de commandes, permettant d'acquérir, de traiter, et d'afficher les données de l'image. Quant à *l'Intellicam*, c'est une interface Windows interactive, il permet une interfaçage rapide, car il donne accès aux fonctions de bases pour opérer la carte, tel que l'acquisition et l'affichage de l'image. C'est également *l'Intellicam* qui permet de configurer les fichiers d'interfaçage *DCF* demandés par *MIL*, et nécessaires pour définir les données d'image de source non-standard comme c'est le cas pour ce capteur d'images prototype.

Les images présentées et analysées pour le reste de ce mémoire, ont été capturées par la carte de capture *Matrox corona-II*, et ses outils de programmation *MIL* et *l'Intellicam*, en développant un code C++ et les fichiers *DCF*s appropriés à ce capteur d'images.

3.6 Résultats préliminaires validant le fonctionnement du circuit de lecture.

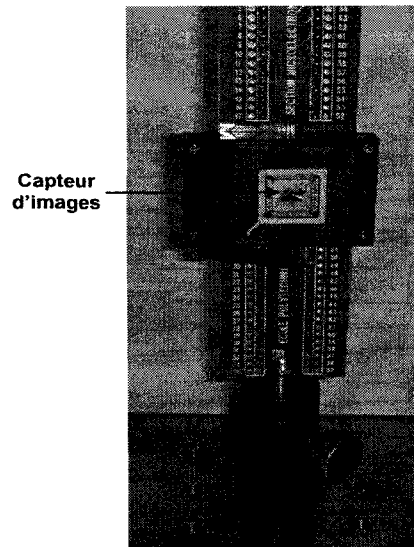


Figure 3-17: Montage de validation du circuit de lecture.

Par un test du capteur d'images, et en comparant les données d'image multiplexées en fonction du temps à l'oscilloscope par rapport à ceux affichées en temps réel sous forme d'image résultante, permet de bien comprendre et d'analyser le fonctionnement du circuit de lecture et de celui du capteur d'images. Pour ce faire, le circuit du capteur d'images de 20 par 20 pixels présenté à la figure 2-4, a été monté tel que l'illustre la figure 3-17. Le circuit d'adressage et les amplificateurs de sorties ont été montés à part sur une plaquette de test, et les différentes matrices du capteur d'images ont été excitées avec un faisceau un laser rouge. La fréquence de balayage de la matrice des pixels est de 10Khz, assez rapide pour donner assez de temps aux pixels de la matrice de se charger à la tension de polarisation.

Matrice-II

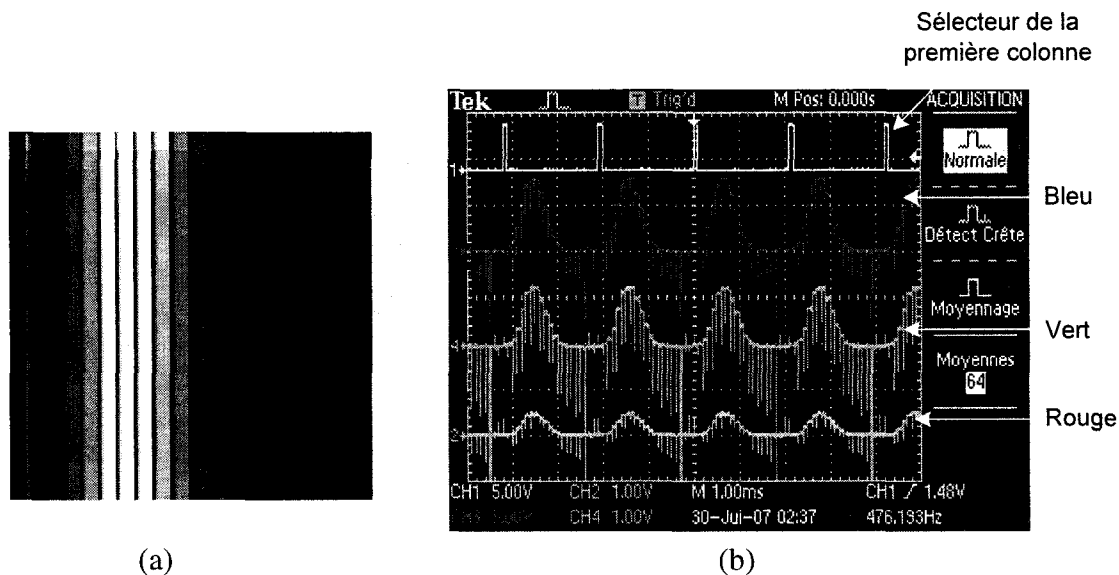


Figure 3-18 : La sortie du capteur d'images illuminé par un faisceau laser rouge. a) image résultat montrant le gradient d'intensité, b) la sortie multiplexée pour les trois électrodes du pixel affichée par l'oscilloscope, et qui correspond au signal d'entrée de l'image a).

La figure 3-18(a) montre l'image monochrome (noir et blanc) capturée par la carte de capture, lorsqu'on illumine une région de la matrice_II. Dans l'image affichée, on y remarque une variation graduelle d'intensité, de la région la plus claire, vers les régions sombres (non illuminées). L'image affichée, est une reconstitution fidèle du faisceau laser utilisé, car comme pour la plus part des sources lasers, la variation spatial de l'intensité se définit par une Gaussienne. Ce gradient d'intensité est également confirmé à la figure 3-18(b), qui montre les trois signaux vidéo (bleu, vert et rouge) affichés à l'oscilloscope. L'image monochrome affichée à figure 3-18(a), est le résultat du signal vidéo vert comme entrée de la carte de capture. Tel qu'illustré par la figure 3-18(b), les pixels dont l'amplitude est plus élevée correspondent aux colonnes les plus illuminées dans l'image de la figure 3-18(a). Dans le cas de la matrice-II, l'amplitude correspond à l'intensité de la colonne, car tous les pixels de la même colonne sont lus en même temps (voir figure 2.6).

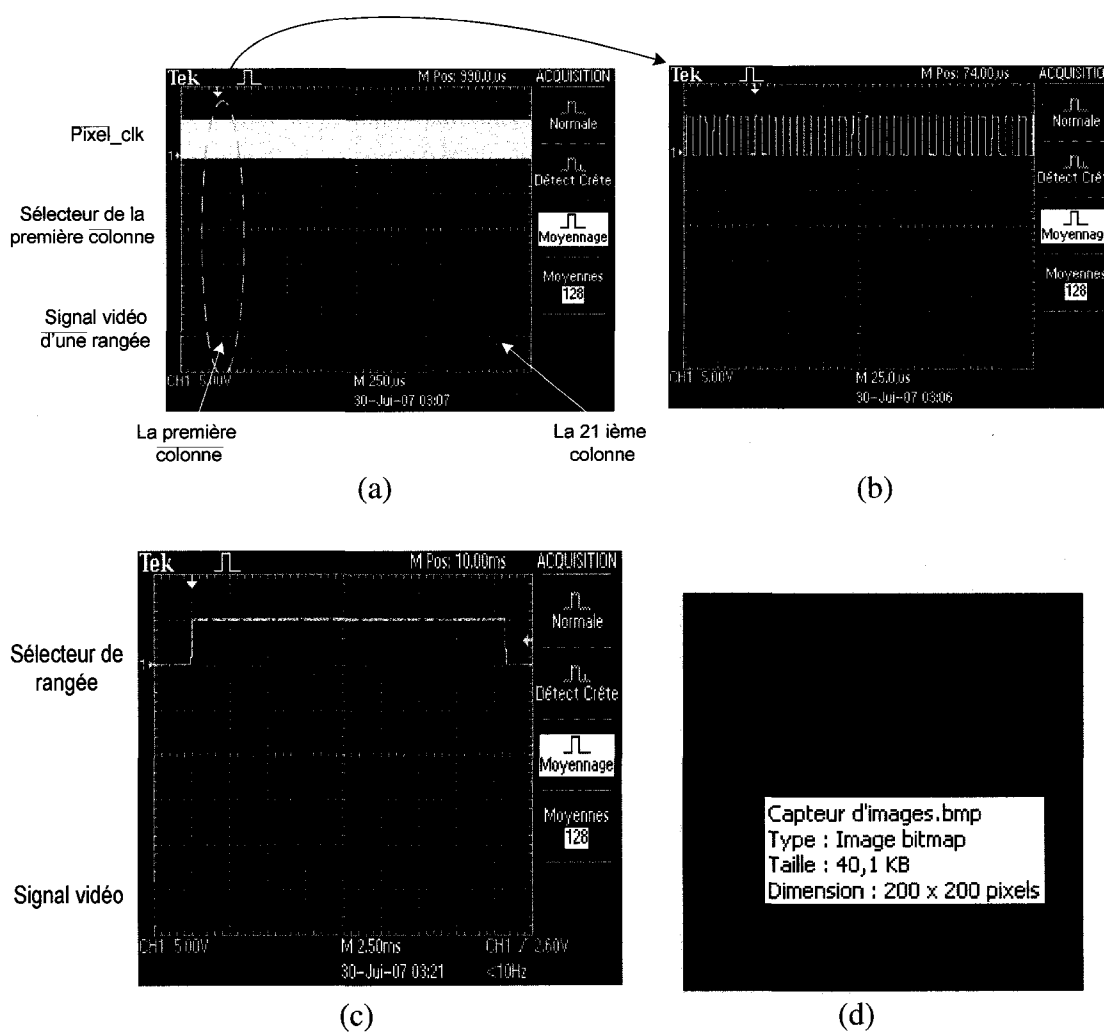


Figure 3-19 : Balayage de la matrice de pixels et affichage sur l'écran d'ordinateur. a) Les pixels d'une rangée de la matrice. b) Affichage horizontal d'un pixel de la matrice. c) Affichage verticale d'un pixel de la matrice. d) Image affichée de 200 x 200 pixels.

La figure 3-19(a) montre le signal vidéo d'une rangée avec la 21^{ème} colonne de synchronisation. Donc, il y a une colonne et une rangée supplémentaires, qui n'apparaissent pas dans l'image affichée, car elles ne sont pas associées à une région active de la matrice des pixels, mais elles correspondent aux signaux de synchronisations qui indiquent la fin d'une rangée ou d'une matrice. La figure 3-19(b) présente un zoom sur les signaux de la figure 3-19(a). On y remarque que la durée d'une impulsion d'un signal sélecteur de colonnes ou la durée d'une colonne, correspond à dix impulsions

d'un signal d'horloge d'affichage à l'écran de l'ordinateur *Pixel_clk*. Et tel que le montre également la figure 3-19(c), la durée d'impulsion d'une rangée de la matrice, correspond à l'affichage du signal vidéo de cette rangée sélectionnée dix fois, avant d'activer une rangée suivante. Tel que mentionné à la section précédente, un pixel de la matrice est affiché sur 10 pixels horizontaux et sur 10 pixels verticaux de l'écran de l'ordinateur, afin d'agrandir et de bien suivre chaque pixel de l'image affichée. Autrement dit, pour un capteur d'images de 20 par 20 pixels, il en résulte une image affichée de 200 par 200 pixels comme le montre la figure 3-19(d).

Matrice-I

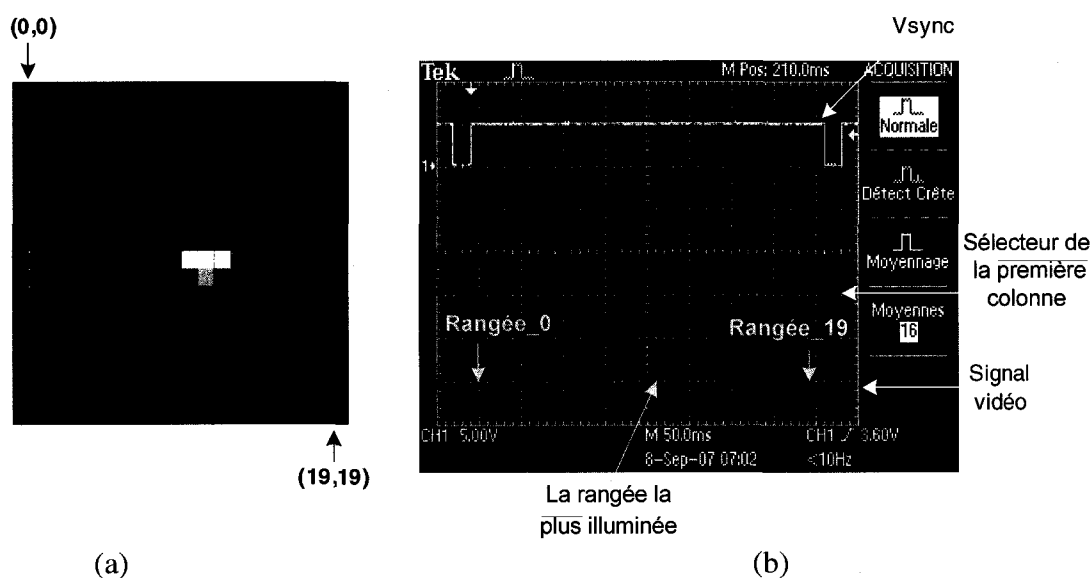


Figure 3-20 : La sortie du capteur d'images a) image résultante, b) La sortie multiplexée pour l'électrode bleue du pixel affichée par l'oscilloscope et qui correspond au signal d'entrée de l'image a).

Tel que mentionné dans la section 2.4 du chapitre 2, la spécificité de la Matrice-I par rapport à la Matrice-II, est qu'on peut accéder à un pixel seul, au lieu d'accéder à toute la colonne de la matrice. En comparant les deux figures 3-20(a) et 3-20(b), on y remarque que la figure 3-20(a) est l'image résultat du signal vidéo multiplexé dans le temps de l'électrode bleue de la figure 3-20(b), qui commence avec le pixel (0,0) et se

termine avec le pixel (19,19). La rangée la plus illuminée est au centre de la matrice tel que le montre le signal vidéo de la figure 3-20(b), et confirmé par l'image résultat de la figure 3-20(a). Dans le sens horizontal de la matrice, les pixels les plus illuminés sont également près du centre, comme le démontre l'oscillogramme de la figure 3-21, qui est une vision horizontale agrandie de la rangée la plus illuminée de la figure 3-20(b).

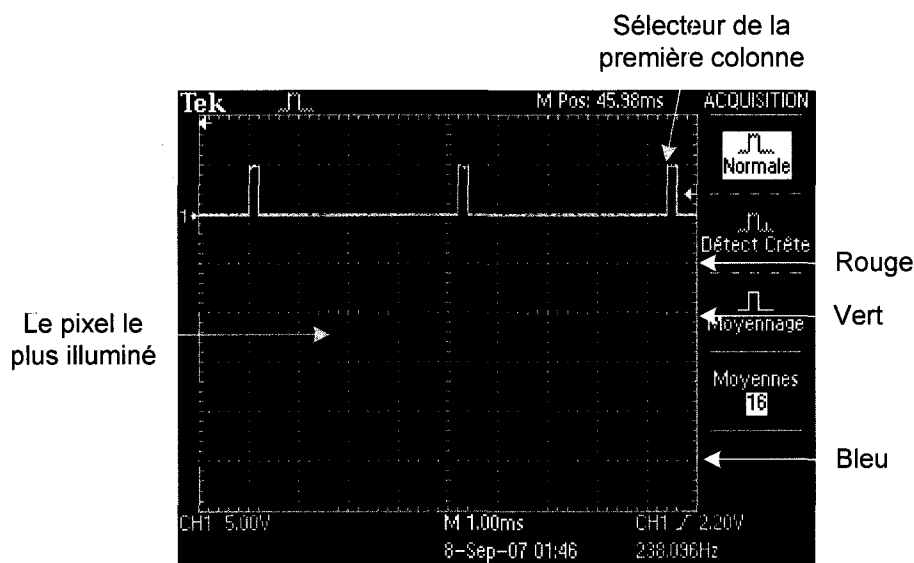


Figure 3-21: La sortie multiplexée pour les trois électrodes du pixel, et qui correspond à la rangée la plus illuminée de la figure 5-19 b)

Comme dans le cas de la matrice-II, le signal vidéo de l'électrode bleue est le plus sensible par rapport aux électrodes verte et rouge, car selon la structure du pixel de cette invention (voir figure 2-2 du chapitre 2), l'électrode bleue est la plus proche de la fenêtre d'illumination. Donc, elle récolte la majorité des charges produites dans cette fenêtre au détriment de deux autres électrodes.

Que ce soit la matrice-II ou la matrice-I de ce capteur d'images, il est important de remarquer que chaque fois que le signal sélecteur de rangée ou celui sélecteur de colonnes, passe d'un niveau haut à un niveau bas, une quantité de charges est perdue ou s'ajoute au signal vidéo, à cause de l'injection de charges. Selon la structure de ce prototype du capteur d'images, ce type de bruit est inévitable, et sera discuté dans le

chapitre suivant. Il est également visible dans les images affichées de la figure 3-18(a) et la figure 3-20(a), par les traits blancs entre les colonnes de la matrice.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, le circuit de lecture de la matrice des pixels a été bien détaillé. L'analyse de différents modules composant le capteur d'images et le circuit de balayage, permet d'avoir une vision globale du fonctionnement du capteur, et ainsi facilitera son étude. L'interfaçage avec l'ordinateur, développé à la section 3-5, servira à distinguer l'effet magnétique recherché, de l'effet mécanique (déplacement d'un faisceau lumineux dans le plan de l'image). Il en sera également discuté dans le chapitre 4. Le chapitre suivant analysera en profondeur les résultats préliminaires présentés dans la section 3-6, ainsi que les effets non linéaires, comme le bruit dû à l'injection de charges.

Après que le circuit de lecture de la matrice des pixels soit complété, il reste à développer un banc de test, et de valider le concept de l'innovation. Ceci fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 4

Banc de test et résultats

4.1 Introduction

Les chapitres précédents de ce mémoire, ont présentés le principe de fonctionnement de la nouvelle méthode de détection de la lumière, ainsi que les différentes approches adoptées pour lire la matrice des pixels du capteur d'images prototype. Or, ce nouveau concept, ainsi que ses limites, doivent être testés. Dans ce chapitre, une analyse détaillée des résultats de test du prototype est présentée.

La première étape, consiste à élaborer un banc de test tenant compte des contraintes du capteur d'images. Ceci est réalisé dans la section 4.2, où les montages mécanique, optique, et électrique sont analysés. Des tests, ainsi qu'une analyse rigoureuse du capteur d'images font l'objet de la section 4.3. Ceci inclut les images capturées de la scène réelle (un faisceau laser), ainsi que des mesures caractéristiques du capteur d'images, comme la réponse du capteur par rapport au champ magnétique et la linéarité du capteur. Également, cette section discute de certains effets non idéals, notamment le bruit de propagation de charges entre les pixels voisins et l'injection de charges.

4.2 Banc de test

Les tests du capteur d'images exigent un banc de test assez particulier. Il comprend un montage mécanique, un montage optique ainsi qu'un montage électrique. Cette section discute séparément des trois montages.

4.2.1 Montage mécanique

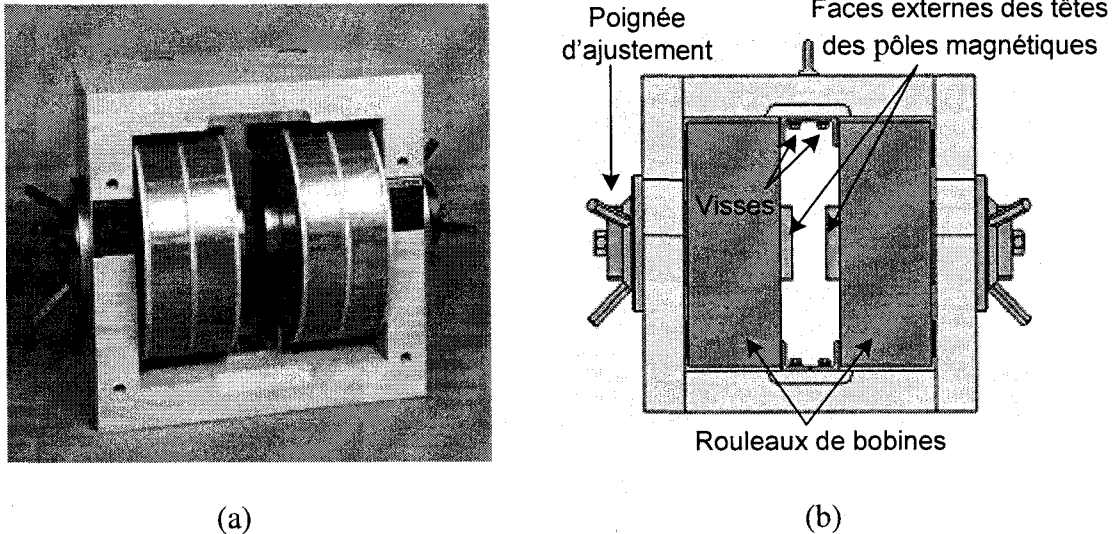


Figure 4-1 : Électro-aimant. a) La photographie de l'électro-aimant. b) Vue de face de l'électro-aimant.

Un champ magnétique est généré par l'électro-aimant de la figure 4-1a. Il s'agit d'un électro-aimant capable de fournir un champ magnétique constant entre les deux pôles magnétiques (voir la figure 4-1b). Ce champ magnétique résulte du courant circulant dans les deux rouleaux de bobines de la figure 4-1b. Ce courant est fourni à son tour par une source d'alimentation DC ajustable, dont la tension et le courant DC maximal est de 60V/83A. Afin d'éviter le réchauffement de l'électro-aimant, un système de refroidissement est déjà prévu et intégré dans l'électro-aimant par le fabricant. Pour ce faire, nous utilisons un système d'alimentation en eau froide déjà disponible dans le laboratoire de test de l'École. Il comporte deux robinets, le premier fourni l'eau froide, alors que le deuxième assure le chemin de retour. Le premier robinet est relié à l'entrée du système de refroidissement de l'électro-aimant, en passant d'abord par un filtre à eau, afin d'éviter que les contaminants provenant des tuyaux de l'école bloquent les petits tuyaux du système de refroidissement de l'électro-aimant. Le deuxième robinet est relié avec la sortie du système de refroidissement de l'électro-aimant, afin d'assurer le chemin

de retour. De cette façon, le système de refroidissement de l'électro-aimant est alimenté en boucle continue.

Il est à noter que la source d'alimentation DC est asservie électroniquement avec le système de refroidissement de l'électro-aimant. Un thermostat, ainsi qu'un détecteur de débit font partie du système de refroidissement de l'électro-aimant. Lorsque l'eau froide qui circule dans le système de refroidissement de l'électro-aimant n'atteint pas un débit d'au moins 4 litres/minute, ou bien que la température des bobines dépasse 50°C, les commutateurs reliant l'électro-aimant avec le bloc d'alimentation DC s'ouvrent, et ainsi le bloc d'alimentation DC s'éteint. Le débit d'opération conseillé est de 6 litres/minute (2 bars). Remarquez que les deux rouleaux de bobines en série, représentent une résistance maximale de 0.71Ω. Donc, la moindre défaillance du système de refroidissement est critique, avec un courant de 83A, il peut y avoir une surchauffe des bobines.

Les têtes des deux pôles magnétiques positionnées face à face (figure 4-1b) peuvent être retirées et remplacées par d'autres têtes de différents diamètres. Ce type d'électro-aimant, peut interchanger quatre têtes de pôle, dont celle de 25mm, 50mm, 75mm et 100mm de diamètre de la face externe. La distance entre les deux pôles magnétiques est également ajustable grâce aux poignées d'ajustement de la figure 4-1b. Elle varie entre 0 mm (lorsque les deux pôles sont avancés jusqu'à ce qu'ils se touchent) et de 82mm (lorsque les deux pôles sont reculés jusqu'à la même distance que celle entre les deux rouleaux de bobines).

Tel qu'illustré sur la figure 4-2 ci-dessous, la valeur du champ magnétique disponible entre les deux pôles dépend fortement de la distance entre ceux-ci, ainsi que du diamètre de la face externe de leurs têtes.

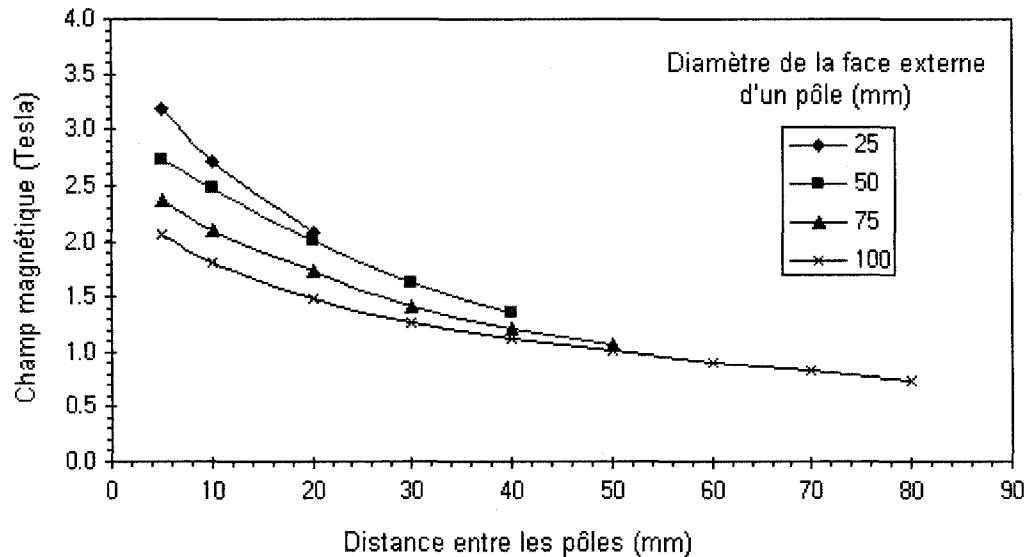


Figure 4-2: Courbe de magnétisation de l'électro-aimant.

Selon la figure 4-2, on y remarque que le champ magnétique est inversement proportionnel à la distance entre les deux pôles magnétiques, et également inversement proportionnel au diamètre de la face externe des têtes des pôles. Intuitivement, afin d'atteindre une valeur de champ magnétique maximale entre les deux pôles, il faut réduire le plus possible la distance entre ces deux pôles, et installer une tête de pôle dont le diamètre de la face externe est le plus petit. Les résultats du capteur d'images avec champ magnétique présentés dans ce mémoire ont été pris avec une tête de pôle dont la face externe est de 25mm de diamètre, soit le diamètre le plus petit compatible avec ce type d'électro-aimant.

4.2.2 Montage optique

Les capteurs d'images sont utilisés pour capturer les images réelles (macroscopiques) de l'environnement, malgré que ces capteurs soient à l'échelle microscopique, par exemple, une largeur de $12\mu\text{m}$ dans le cas d'un pixel de notre prototype. Ceci est rendu possible grâce aux composants optiques tels qu'illustrés à la figure 4-3, capables de concentrer un faisceau lumineux provenant de l'environnement ou d'un laser, sur une surface microscopique.

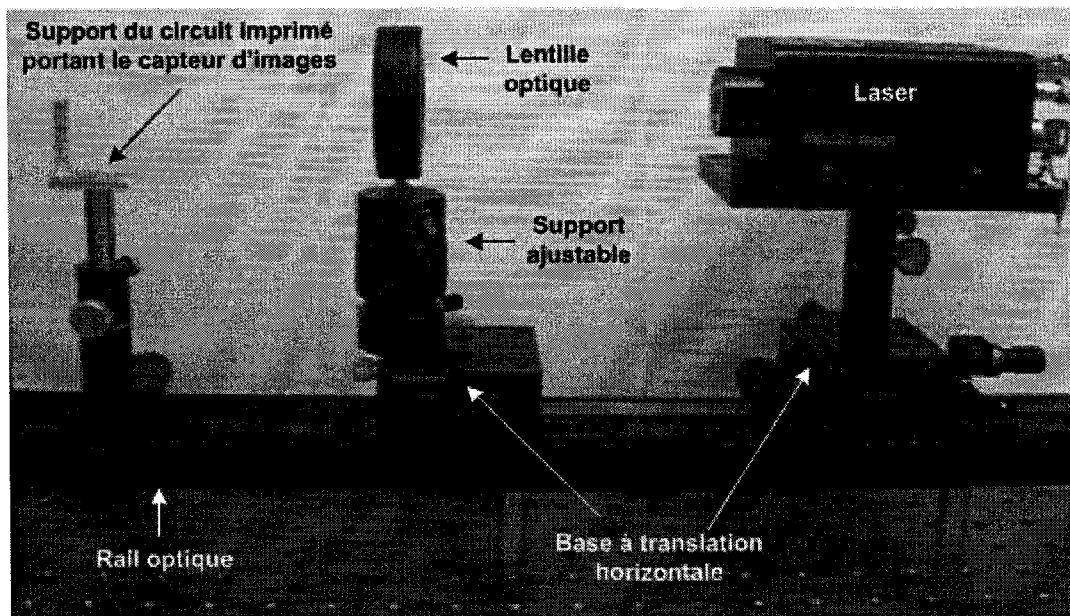


Figure 4-3: Schéma du montage optique.

Selon la figure 4-3, un rail optique en aluminium (un matériau non magnétisable) est utilisé pour aligner les composants du système optique et permet d'ajouter un degré de liberté dans l'axe optique, nécessaire pour l'ajustement de la distance focale. Ce rail est fixé sur la table optique.

Le circuit imprimé sur lequel le capteur d'images est monté est fixé sur un support. Tel que montré à la figure 4-4 ci-dessous. Ce support est placé à l'intérieur de deux pôles de l'électro-aimant, et, avec un ajustement vertical, la hauteur est fixée de façon à ce que le capteur d'images soit au centre des deux pôles magnétiques. Quant au support du laser, il permet de fixer le faisceau à la même hauteur que le capteur d'images. Le faisceau est ramené au centre du capteur d'images, grâce à la base de translation horizontale ayant une résolution de $6\mu\text{m}$. Une lentille optique est utilisée pour concentrer le faisceau laser à l'intérieur du capteur d'images sous-test.

Pour un faisceau laser qui éclaire une surface à travers une telle lentille optique, le rayon minimum r_{\min} du point résultant sur cette surface peut être évalué approximativement par la relation suivante :

$$r_{\min} = \frac{4}{3} \times \frac{1.22\lambda f}{D} \quad (4-1)$$

Où λ est la longueur d'onde du faisceau laser, f la distance focale, et D le diamètre de la lentille. Dans le cas des composants utilisés dans ces tests, $\lambda = 635$ nm pour un laser rouge, $f = 200$ mm, et $D = 40$ mm. Ce qui implique un point de rayon minimal, $r_{\min} \approx 5 \mu\text{m}$, plus petit que l'aire du pixel de $12 \mu\text{m}$ de côté du prototype. Donc, il est possible d'éclairer seulement un pixel de la matrice.

Tel qu'illustré sur la figure 4-3, la lentille optique est montée sur un support ajustable, et ce dernier repose à son tour sur une base à translation horizontale. De cette façon, le support ajustable de la lentille permet un balayage vertical du faisceau dans le plan du capteur avec une résolution de 0.05 mm, et un balayage horizontal grâce à la base à translation horizontale avec une résolution de $3 \mu\text{m}$.

Le montage de la figure 4-3 permet d'ajuster la distance focale en déplaçant la lentille dans l'axe optique le long du rail optique, jusqu'à avoir un point d'un rayon visé (le nombre de pixels d'intérêt à éclairer). Et puis, ce point peut être déplacé partout dans le plan du capteur d'images et éclairer n'importe quel pixel de la matrice, grâce aux micro-positionneurs vertical et horizontal. L'affichage de l'image en temps réel du faisceau laser avec la carte d'acquisition Corona-II permet de localiser le point dans le plan du capteur d'images.

4.2.3 Montage électrique

Après avoir complété le montage mécanique et le montage optique, un circuit imprimé qui tient compte des contraintes de l'environnement de test, surtout de l'électro-aimant,

s'avère nécessaire. Il comprend deux circuits imprimés différents, tel que le montre la figure 4-4 ci-dessous :

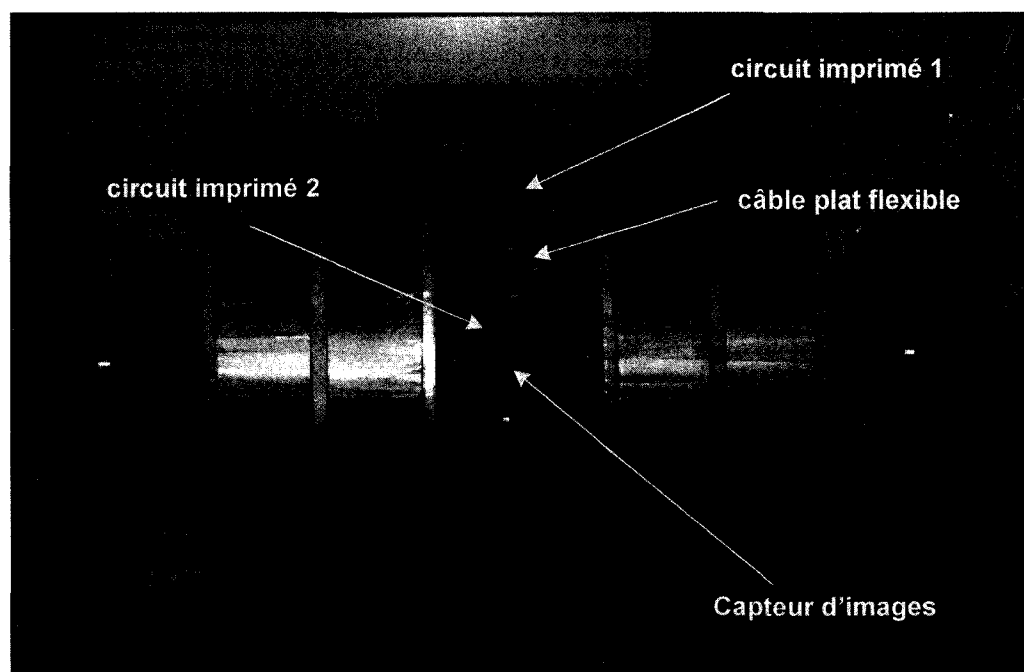


Figure 4-4 : La photographie du circuit imprimé et le capteur d'images à l'intérieur de l'électro-aimant.

a. Circuit imprimé 1

Ce circuit imprimé sert à contenir tous les composants du circuit de lecture discuté au chapitre 3. La seule contrainte majeure est la surface. La figure 4-5 ci-dessous, illustre ce circuit imprimé qui occupe la surface entre les deux rouleaux de bobines, au dessus des deux pôles magnétiques. Il est fixé par les deux visse du haut de l'électro-aimant (voir la figure 4-1b) et prend exactement la forme de cette surface.

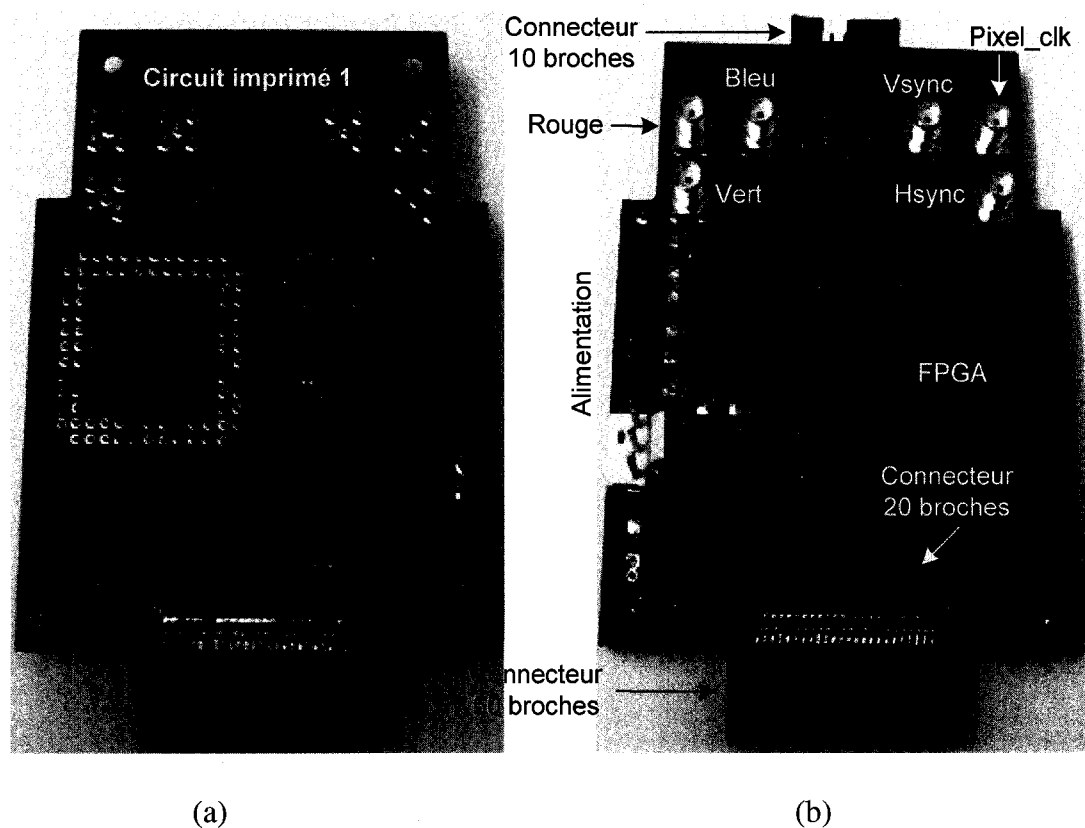


Figure 4-5 : Circuit imprimé 1, a) Vue recto. b) Vue verso.

Afin d'optimiser cette surface, un circuit intégré LM348 contenant quatre amplificateurs, ainsi qu'un autre circuit intégré MMDT4413 qui contient les deux transistors bipolaires NPN et PNP, ont été utilisés. Tel qu'illustré sur la figure 4-5b, les trois signaux vidéo bleu, vert, et rouge de sortie, ainsi que les trois signaux de synchronisation Pixel_clk, Hsync, et Vsync, se trouvent au verso du circuit imprimé avec les connecteurs SMA afin d'être reliés directement avec les connecteurs BNC du câble COR2-44-TO-13 de Matrox, qui relie le capteur d'images et la carte d'acquisition Corona-II de l'ordinateur. Selon cette même figure 4-5b, les pins d'alimentation se retrouvent également au verso pour la seule raison de dégager le devant du circuit de tous fils pouvant nuire à l'alignement optique. Les deux connecteurs de 20 broches chacun, permettent de lire les signaux intermédiaires entre le capteur d'images et le circuit d'adressage, pour les rangées et pour les colonnes séparément. Ils sont envoyés

via un câble plat au circuit imprimé 3 (ce circuit apparaît sur la figure 4-7 ci-dessous) réservé aux boutons de commandes afin de faciliter leur accès.

La figure 4-5, montre également un autre connecteur de 50 broches, monté à l'extrémité inférieure du circuit imprimé 1. Il sert de connexion entre le circuit imprimé du module du circuit de lecture, et celui du capteur d'images. Il comprend :

- 40 signaux d'adressage envoyés au capteur d'images se trouvant sur le circuit imprimé 2 par le circuit de lecture monté sur le circuit imprimé 1, dont les 20 signaux pour les rangées, et les 20 signaux pour les colonnes,
- Deux signaux d'alimentation VDD et VSS, du circuit imprimé 1, au circuit imprimé 2,
- Trois signaux vidéo de sortie (bleu, vert, et rouge), du circuit imprimé 2, aux connecteurs SMA du circuit imprimé 1.

Les cinq signaux flottants du connecteur de 50 broches sont reliés à la masse afin de minimiser les sources de bruit.

Le champ magnétique diminue considérablement au fur et à mesure qu'on s'éloigne des deux pôles magnétiques de l'électro-aimant. Il est moins intense au niveau du circuit imprimé 1. Malgré que le champ magnétique soit moins intense au niveau du circuit imprimé 1, il y crée quelques déplacements mécaniques. Ceci est lié à l'attraction que le champ magnétique exerce sur la couche de nickel utilisée dans le circuit imprimé 1 et de certaines broches de circuits intégrés qui sont magnétisables. Ces déplacements mécaniques ne sont pas visibles à l'œil nu, mais à l'échelle microscopique (au niveau du capteur d'images), il suffit d'un déplacement d'au moins $12\mu\text{m}$ (la taille d'un pixel) pour déplacer le faisceau laser d'un pixel à l'autre. Il est à noter que lorsque le capteur d'images est sous test, soumis au champ magnétique, et que les déplacements mécaniques venant du circuit imprimé 1 sont transmis au circuit imprimé 2 (au niveau du capteur d'images), il devient difficile de distinguer l'effet magnétique recherché (l'effet du concept), de l'effet perturbateur mécanique. D'où, il est important de

minimiser, voire éliminer cet effet mécanique lié aux petits déplacements du circuit imprimé 1. Afin d'éviter cette transmission directe de déplacements mécaniques du circuit imprimé 2 incluant le capteur d'images, un câble plat flexible adapté assure le pont entre ces deux circuits imprimés tel que l'illustre la figure 4-4. Les mouvements mécaniques produits dans le circuit imprimé 1 dû au champ magnétique, sont amortis par ce câble plat flexible avant d'être transmis au circuit imprimé 2 qui ne contient aucun matériau magnétisable. De cette façon, le mouvement est moins ressenti au niveau du capteur d'images. Le câble plat adapté est conçu court afin de rapprocher les signaux entre les deux circuits imprimés et ainsi assurer leurs intégrités.

Sur le circuit imprimé 1, il est à noter que, le gain de l'amplificateur de transimpédance de la figure 3-13, a été fixé à $1M\Omega$ dans le cas du signal vidéo bleu, alors que celui des deux autres signaux vidéo rouge et vert, ait été maintenu à $5M\Omega$, afin d'éviter la saturation de la carte d'acquisition Corona-II. Tel que constater sur la figure 3-21, le signal vidéo bleu est le plus sensible. Donc, les signaux vidéo et les images associées qui seront affichés plus tard dans la section 4-3 de ce chapitre, auront un gain plus faible d'un facteur cinq dans le cas du signal vidéo bleu par rapport aux autres. Cette différence de gain sera tenue en compte au niveau du traitement des signaux dans le code MatLab.

b. Circuit imprimé 2

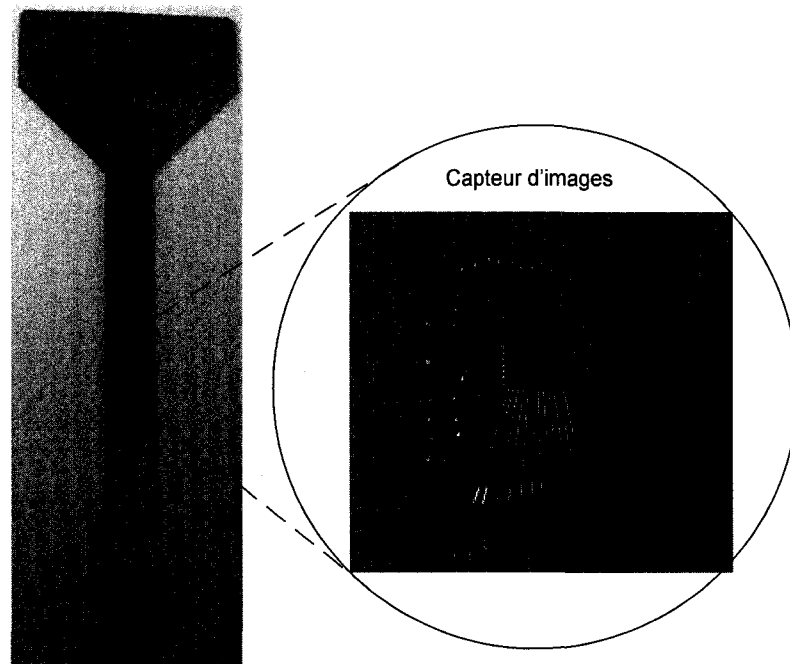


Figure 4-6: Le circuit imprimé 2 contenant le capteur d'images.

La figure 4-6, montre le circuit imprimé 2, sur lequel le capteur d'images est monté. Il est placé entre les deux pôles magnétiques, tel qu'illustré sur la figure 4-4, de façon à ce que le capteur soit au centre des deux pôles, la région dans laquelle le champ magnétique est maximal et constante. Également, le capteur d'images doit être placé perpendiculairement avec les lignes de champ magnétique à l'intérieur des deux pôles afin de maximiser l'intensité de la force magnétique (*force de Lorentz*) responsable de la déviation des charges générées par le rayonnement électromagnétique.

L'intensité du champ magnétique entre les deux pôles dépend fortement de la distance entre eux, et du diamètre de leurs faces externes. Comme des pôles, dont les diamètres des faces externes de 25mm (le plus petits compatible avec cet électro-aimant), sont déjà installés, le seul paramètre qui influe sur la densité du champ magnétique entre les pôles, est la séparation entre eux. Donc, l'objectif est d'avoir la partie du circuit imprimé 2 qui

se trouve entre les deux pôles la moins large possible afin d'augmenter la gamme de valeurs du champ magnétique qu'on peut obtenir entre ces deux pôles (voir figure 4-2). En tenant compte de la largeur du capteur d'images et de la distance minimale de $5\mu\text{m}$ qu'il faut avoir entre les plots de sortie des conducteurs du circuit imprimé, la largeur minimale obtenue pour le circuit imprimé 2 est de 6 mm. Cette distance de 6 mm entre les deux pôles de 25 mm de diamètres des faces externes, nous permet d'atteindre un champ magnétique d'environ 3 Tesla selon la figure 4-2.

Dans la même logique d'éliminer les forces mécaniques agissant sur le capteur d'images, et ainsi éviter de perturber l'alignement optique, il est à noter qu'aucun matériau magnétisable n'est utilisé sur le circuit imprimé 2. Tous les conducteurs sont en cuivre, un matériau non magnétisable. De cette façon, aucun déplacement mécanique du capteur d'images lié au champ magnétique n'est possible, malgré que ce dernier soit placé dans la région où l'intensité du champ magnétique est la plus intense.

c. Circuit imprimé 3

Pour ne pas perturber l'alignement optique, le circuit imprimé 3 contient tous les boutons de commandes et les connecteurs qui permettent de lire les signaux intermédiaires des rangées et des colonnes. Il est placé à l'extérieur de l'électro-aimant et est relié avec le circuit imprimé 1 par un câble plat, à partir des connecteurs de 10 broches pour les boutons de commande, et de 20 broches pour les signaux intermédiaires de rangées et de colonnes séparément (voir la figure 4-5b).

4.3 Résultats de tests

Dans cette section, les résultats de test du capteur d'images prototype sont analysés. Les images en temps réel, ainsi que leurs données correspondantes affichées par l'oscilloscope sont présentées. Ces images correspondent à un faisceau laser pointé directement dans le plan du capteur à travers la lentille optique tel qu'illustré sur la

figure 4-7 du banc de test. L'usage du laser permet d'avoir un faisceau non diffus, concentré sur une petite surface dont tous les photons ont la même énergie et la même longueur d'onde (même couleur), dans le but d'étudier le concept du prototype et mesurer sa sensibilité. L'alignement optique, la distance focale et la puissance du faisceau laser sont ajustés progressivement jusqu'à ce qu'une image claire soit obtenue.

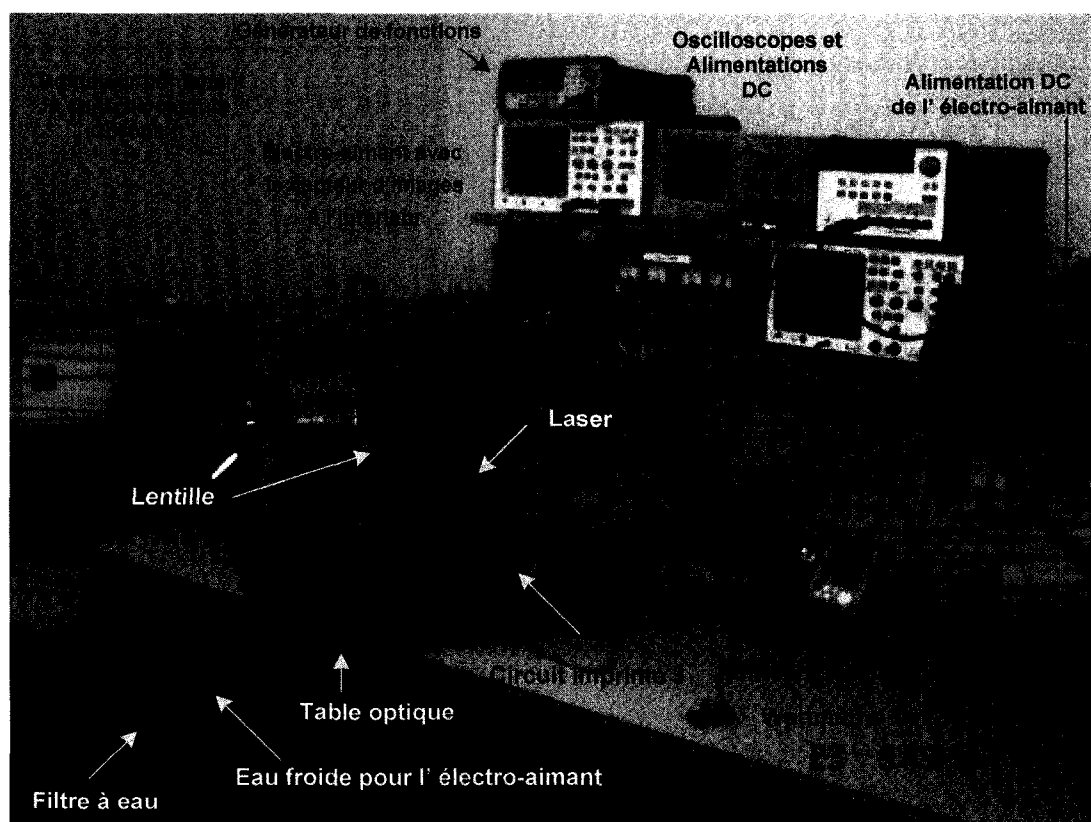


Figure 4-7: Photographie du banc de test général.

La figure 4-7, montre le banc de test complet utilisé pour la caractérisation du capteur d'images. Il comprend un électro-aimant, les appareils de mesure, les alimentations, ainsi qu'un ordinateur d'interface. Parmi les appareils de mesure, on retrouve un wattmètre pour mesurer la puissance du faisceau laser, et un teslamètre numérique pour mesurer l'intensité du champ magnétique entre les deux pôles magnétique de l'électro-aimant.

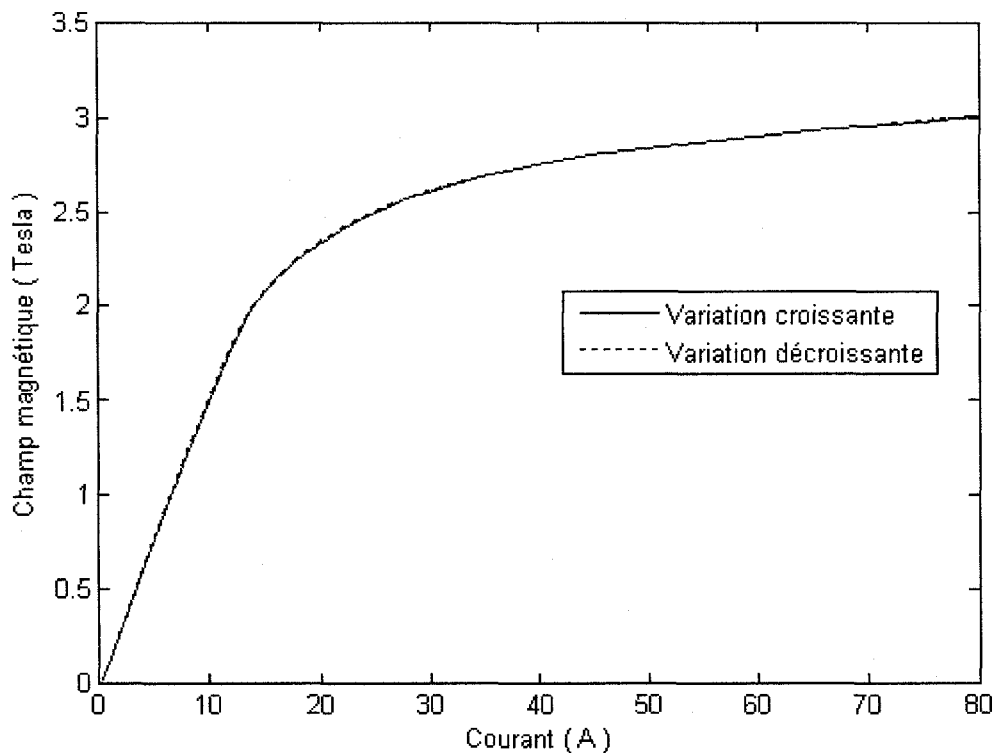


Figure 4-8: Courbe d'hystérésis de l'électro-aimant.

La figure 4-8, montre la relation entre le champ magnétique et le courant électrique qui circule dans les bobines de l'électro-aimant fourni par l'alimentation DC ajustable. Ce champ magnétique est mesuré à l'aide du teslamètre de la figure 4-7 entre les deux pôles avec une distance inter-pôle de 7 mm. La largeur du circuit imprimé 2 étant de 6 mm, une distance de 7mm entre les deux pôles s'est avérée optimal afin de ne pas perturber l'alignement optique.

Selon cette même figure 4-8, on remarque qu'un champ magnétique, dont l'intensité varie de 0 à environ 3Tesla, est appliqué au capteur d'images qui se trouve entre les deux pôles de l'électro-aimant, tout simplement en variant le courant DC qui circule dans les bobines, et fourni par l'alimentation DC ajustable de l'électro-aimant.

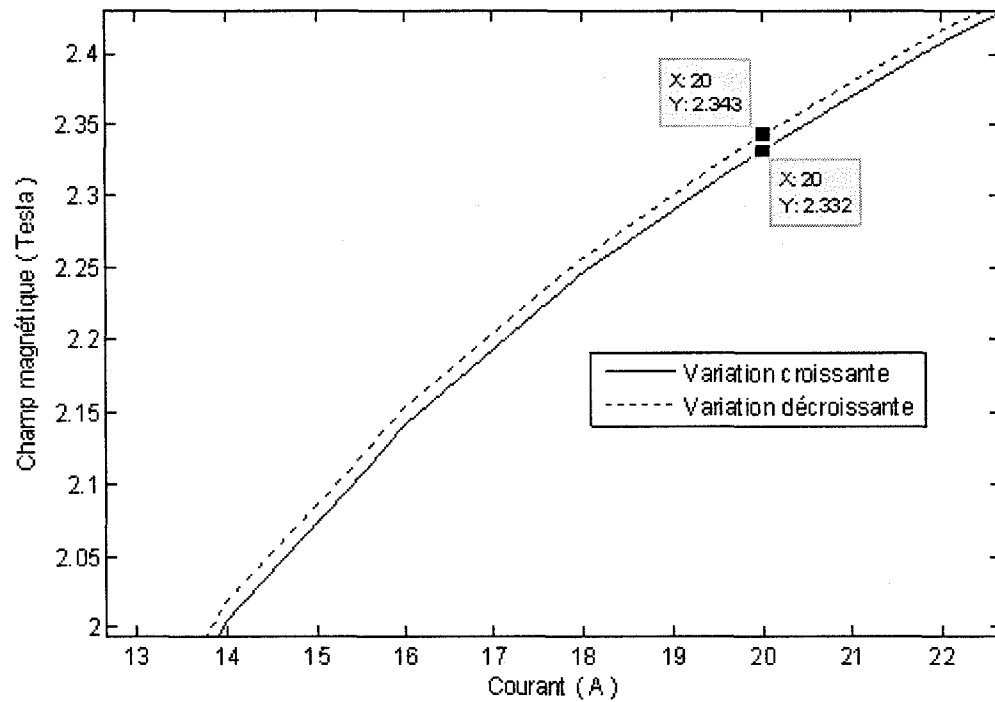


Figure 4-9: Courbe d'hystérésis de l'électro-aimant agrandie.

La figure 4-8, représente deux courbes de champ magnétique. Une courbe en trait plein, obtenue avec une variation croissante du courant électrique dans les bobines, et une courbe en trait brisé, obtenue en retranchant progressivement (variation décroissance) le courant électrique dans les bobines. La figure 4-9 est un agrandissement de la figure 4-8. Les deux courbes ne sont pas parfaitement superposées. Donc, l'électro-aimant utilisé comporte une petite hystérésis d'une variation maximale d'environ 11mT au niveau de 20A.

4.3.1 Validation du concept

Les oscillogrammes présentés dans cette section sont affichés en trois différentes couleurs, soient les couleurs bleue, verte, et rouge. De plus les entrées rouge, verte et bleue de la carte de capture d'images sont utilisées. En réalité :

- **Le signal vidéo bleu ou la couleur bleue**, correspond à la première électrode proche de la fenêtre d'illumination, associée à la pénétration de la longueur d'onde qui correspond à la couleur bleue tel qu'illustré sur la figure 2-2 et cette électrode capte tout ce qui est dans la bande visible. Autrement dit, elle capte les trois couleurs bleue, verte et rouge
- **Quant au signal vidéo vert ou la couleur verte**, correspond à la deuxième électrode associée à la pénétration de la longueur d'onde du vert, mais elle capte les couleurs primaires rouge et verte également.
- **Le signal vidéo rouge ou la couleur rouge**, correspond à la troisième électrode associée à la pénétration de la longueur d'onde du rouge. Cette électrode ne capte que le signal correspondant aux longueurs d'onde du rouge.

Il faut également noter que, les signaux vidéos rouges et verts, ainsi que leurs images associées présentées ci-dessous, ont un gain de 5 de plus par rapport aux signaux vidéos bleus.

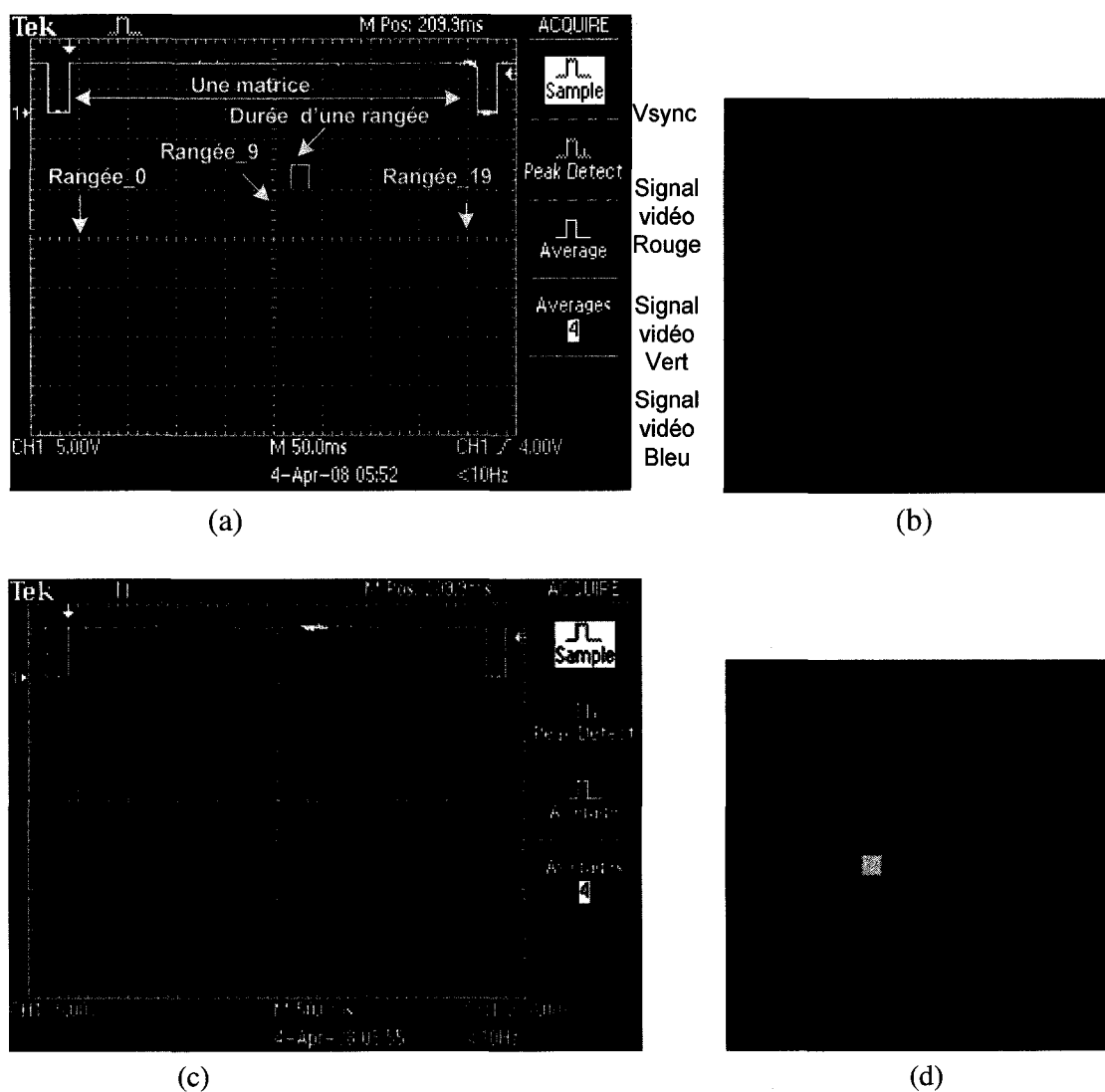


Figure 4-10: La sortie couleur du capteur d'images, pour un faisceau laser rouge. a) La sortie simultanée pour les trois électrodes sans champ magnétique telle qu'affichée par l'oscilloscope. b) L'image couleur résultat qui correspond au signal d'entrée de l'image a). c) La sortie simultanée pour les trois électrodes avec un champ magnétique telle qu'affichée par l'oscilloscope. d) L'image couleur résultante correspondant au signal d'entrée de l'image c).

La figure 4-10, montre le signal vidéo pour chacune des trois sorties (rouge, verte, et bleue) du capteur d'images, ainsi que l'image résultante affichée à l'écran de l'ordinateur et observée en temps réel. Tel que mentionné précédemment à la section 3.2 du chapitre 3, le signal vidéo (rouge, vert, bleu), correspond aux différents niveaux de

tensions provenant de chaque pixel de la matrice, et dont les amplitudes diffèrent d'un pixel à l'autre dépendamment de l'intensité lumineuse qui lui parvient. Le capteur d'images est illuminé par un faisceau laser rouge (une longueur d'onde de 635nm), avec une puissance laser de 2.84mW, et une fréquence de balayage des pixels de 10Khz.

La figure 4-10a, représente les trois signaux vidéo de sortie, et la figure 4-10b son image couleur résultante, lorsque aucun champ magnétique n'est appliqué au capteur d'images. Quant à la figure 4-10c et la figure 4-10d, elles représentent le signal vidéo, ainsi que l'image couleur résultante, lors qu'un champ magnétique de 2.88 Tesla est appliqué au capteur d'image en gardant les mêmes conditions d'illumination du capteur et le même alignement optique (mêmes pixels éclairés) qu'à la figure 4-10a.

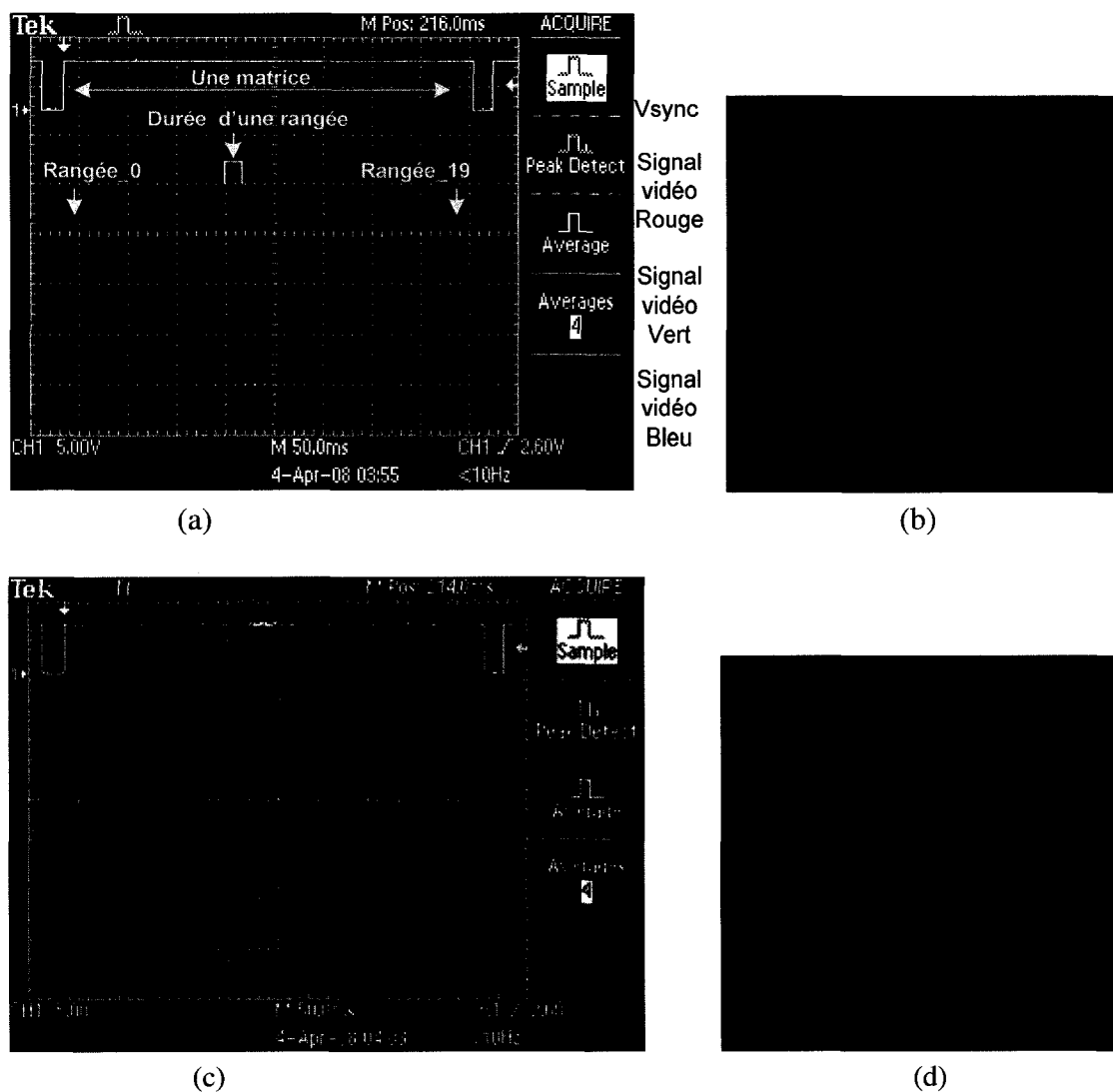


Figure 4-11: La sortie couleur du capteur d'images, pour un faisceau laser vert. a) La sortie simultanée pour les trois électrodes sans champ magnétique telle qu'affichée par l'oscilloscope. b) L'image couleur résultante qui correspond au signal d'entrée de l'image a. c) La sortie simultanée des trois électrodes avec un champ magnétique telle qu'affichée par l'oscilloscope. d) L'image couleur résultante qui correspond au signal d'entrée de l'image c.

La figure 4-11, représente le signal vidéo, ainsi que l'image correspondante lorsque le capteur d'images est illuminé par un faisceau laser vert de longueur d'onde de 532nm, avec une puissance laser de 6 mW.

Le signal vidéo de la figure 4-11a, ainsi que l'image couleur résultante de la figure 4-11b, sont les résultats de sorties du capteur d'images à l'absence du champ magnétique, tandis que le signal vidéo de la figure 4-11c et l'image correspondante de la figure 4-11d représentent les résultats du capteur lorsqu'un champ magnétique de 2.88 Tesla est également appliqué au capteur d'images.

Le champ magnétique sur le capteur d'images a pour effet d'augmenter la sensibilité du capteur quelque soit la longueur d'onde de la source lumineuse, tel qu'on peut le constater sur la figure 4-10, lorsque le capteur est illuminé par un faisceau laser rouge et sur la figure 4-11, lorsque l'illumination du capteur provient d'un laser vert. Dans le cas où le capteur d'images est illuminé par un faisceau laser rouge, le faisceau laser reçu par le capteur couvre un diamètre minimal de 3 pixels, alors que pour le cas du laser vert, le diamètre minimal est de 7 pixels. Ceci semble diverger avec le rayon minimal théorique de la relation (4-1). Cette divergence vient du fait que les deux types de lasers utilisés n'ont pas la même distance focale pour la même lentille, y compris la distorsion ajoutée par la lentille dépendamment de la longueur d'onde à converger.

La figure 4-12 ci-dessous, analyse en détail le comportement du capteur d'image en présence du champ magnétique en observant cet effet au niveau du pixel. Elle analyse les pixels de la neuvième rangée de la figure 4-10a, ainsi que l'image monochrome correspondante (seulement le signal vidéo de l'électrode bleue est numérisé et affiché à l'ordinateur).

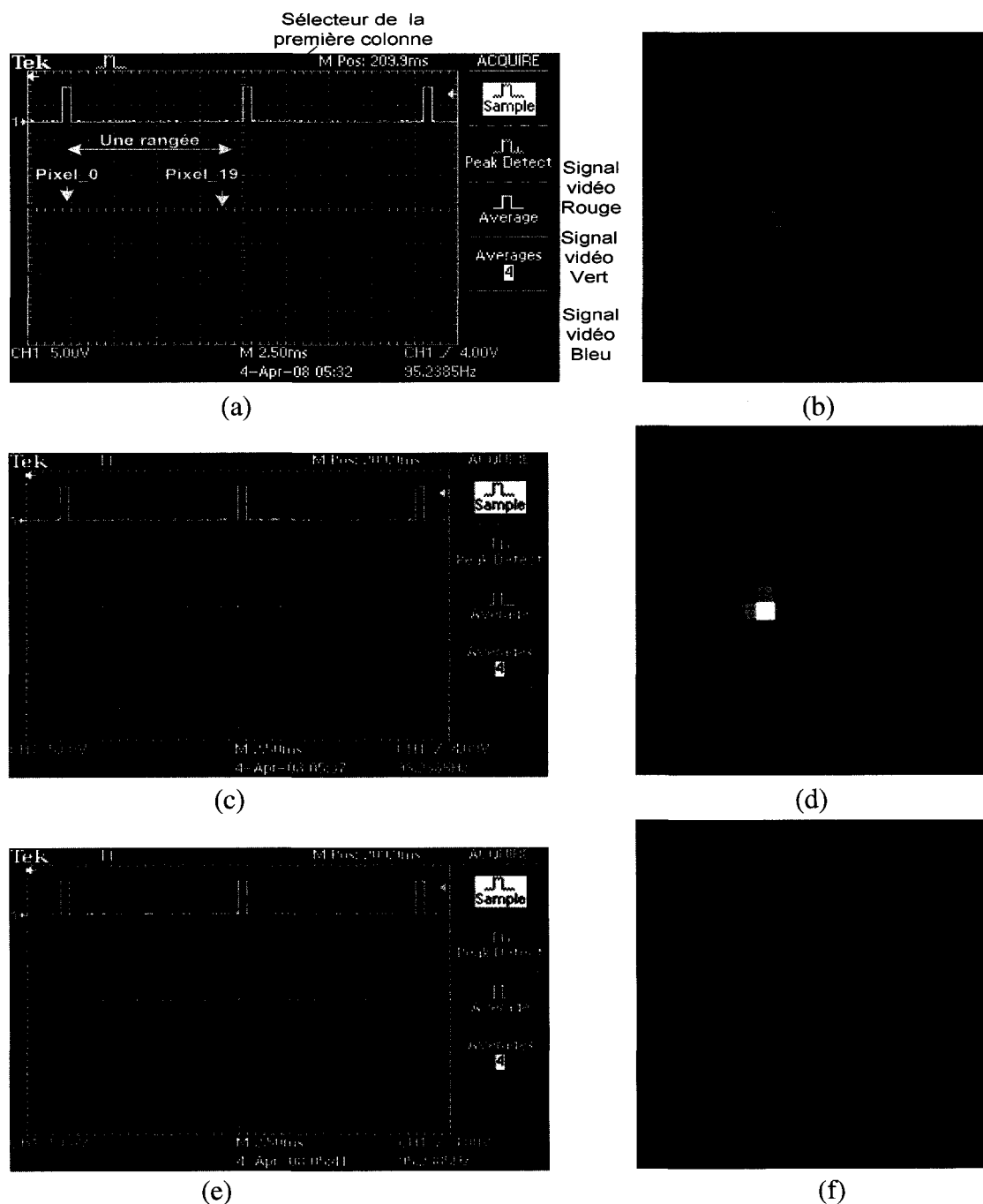


Figure 4-12: La sortie de la neuvième rangée du capteur d'images, pour un faisceau laser rouge. a) La sortie des trois électrodes sans champ magnétique. b) L'image monochrome qui correspond au signal bleu d'entrée de la figure a. c) La sortie des trois électrodes avec un champ magnétique entrant. d) L'image monochrome qui correspond au signal bleu d'entrée de la figure c. e) La sortie des trois électrodes avec un champ magnétique sortant. f) L'image monochrome qui correspond au signal bleu d'entrée de la figure e.

Les figures 4-12a et 4-12b, présentent le signal vidéo ainsi que l'image monochrome associée, lorsque le capteur d'images n'est pas soumis à un champ magnétique. Tel qu'on peut le voir sur la figure 4-12a, l'électrode bleue est la plus sensible par rapport aux électrodes verte et rouge. Donc, en l'absence du champ magnétique, les charges générées dans un pixel par un faisceau lumineux, suivent la trajectoire du champ électrique (voir la figure 3-3). Étant donné que l'électrode bleue est la plus proche de la fenêtre d'illumination (voir la figure 2-2), elle récolte la majorité des charges produites dans cette fenêtre d'illumination au détriment des deux autres électrodes, à savoir l'électrode verte et l'électrode rouge.

Lorsque le champ magnétique est appliqué au capteur d'images dans le sens des y positive tel que montré sur la figure 2-2 du chapitre 2, la force de Lorentz résultante pointe à la surface du substrat vers les trois électrodes, et par conséquent, les charges générées par le faisceau lumineux sont déviées par cette force magnétique, et ainsi collectées par les trois électrodes. De cette façon, la sensibilité du capteur augmente, tel qu'illustré sur la figure 4-12c et 4-12d. De la même façon, en orientant le champ magnétique dans le sens des y négative (ceci est réalisé en changeant le sens du courant circulant dans les bobines de l'électro-aimant), la force de Lorentz résultante change d'orientation, et pointe vers le fond du substrat. Par conséquent, les charges générées par le faisceau lumineux, sont repoussées vers le fond du puits-N, et ainsi diminue la sensibilité du capteur d'images, comme le montre la figure 4-12e et 4-12f.

Les images de la figure 4-12d et 4-12f, prouvent exactement qu'il s'agit de l'effet magnétique prévu par le concept de l'innovation, et non pas l'effet mécanique qui agit sur le capteur d'images. Il faut noter que, s'il y avait une force mécanique agissant sur le capteur d'images lorsque le champ magnétique est appliqué, cette force mécanique aura l'effet de perturber l'alignement optique et ceci sera perçu dans les images 4-12d et 4-12f qui changeront de position dans le plan du capteur par rapport à l'image initiale 4-12b prise sans champ magnétique.

A. La réponse du capteur en fonction du champ magnétique

Dans la même optique d'étudier ce nouveau concept du capteur d'images, ce qui suit analyse le comportement de chaque électrode du capteur face au champ magnétique et lorsque le capteur est irradié par différentes longueurs d'onde. Pour ce faire, nous illuminons le capteur avec deux faisceaux laser séparés, un laser vert (532nm) et un laser rouge (635nm). À chaque valeur du champ magnétique, nous calculons la réponse R (ampère/watts) correspondante, tel que régie par la relation suivante :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{400} V_{pix}}{R_m \cdot P_L \cdot FF} \quad (4-2)$$

Avec, V_{pix} , la valeur numérique de la tension d'un pixel d'un capteur, R_m , le gain de l'amplificateur de transimpédance, $5M\Omega$, P_L , la puissance du faisceau laser de 6 mW pour la laser vert et 1.4 mW pour le laser rouge, et FF le facteur de remplissage « *Fill Factor* » qui est de 9.42%.

Remarquez qu'en comptabilisant tous les 400 pixels du capteur, cela permet de tenir compte des petits déplacements mécaniques, en notant que l'image résultat du faisceau laser ne sort pas du plan délimité par la matrice de pixels . Cette sommation permet également d'éliminer en partie les différents bruits du capteur. Quant à la pondération de la puissance du faisceau laser avec le facteur de remplissage FF , ceci permet de tenir compte seulement de la puissance atteignant la surface sensible à la lumière qui est dans le cas de ce capteur prototype 9.42% de la puissance totale P_L mesurée à la distance focale.

En utilisant la librairie de développement de Matrox *MIL*, une routine C++ a été développé et permet d'acquérir, de numériser, de stocker une image du capteur de 20x20 pixels et de l'afficher en temps réel sur 200x200pixels pour pouvoir visualiser les différents pixels du capteur tel qu'il a été décrit à la section 3.3. Pour chaque valeur du

champ magnétique, un code Matlab calcule la réponse R du capteur d'image de l'équation (4-2). C'est également dans ce code Matlab que le gain manquant de 5 sur l'électrode bleue par rapport aux électrodes rouge et verte est ajouté.

La figure 4-13 ci-dessous, représente le résultat de la réponse absolue du capteur d'images à chaque valeur du champ magnétique appliqué.

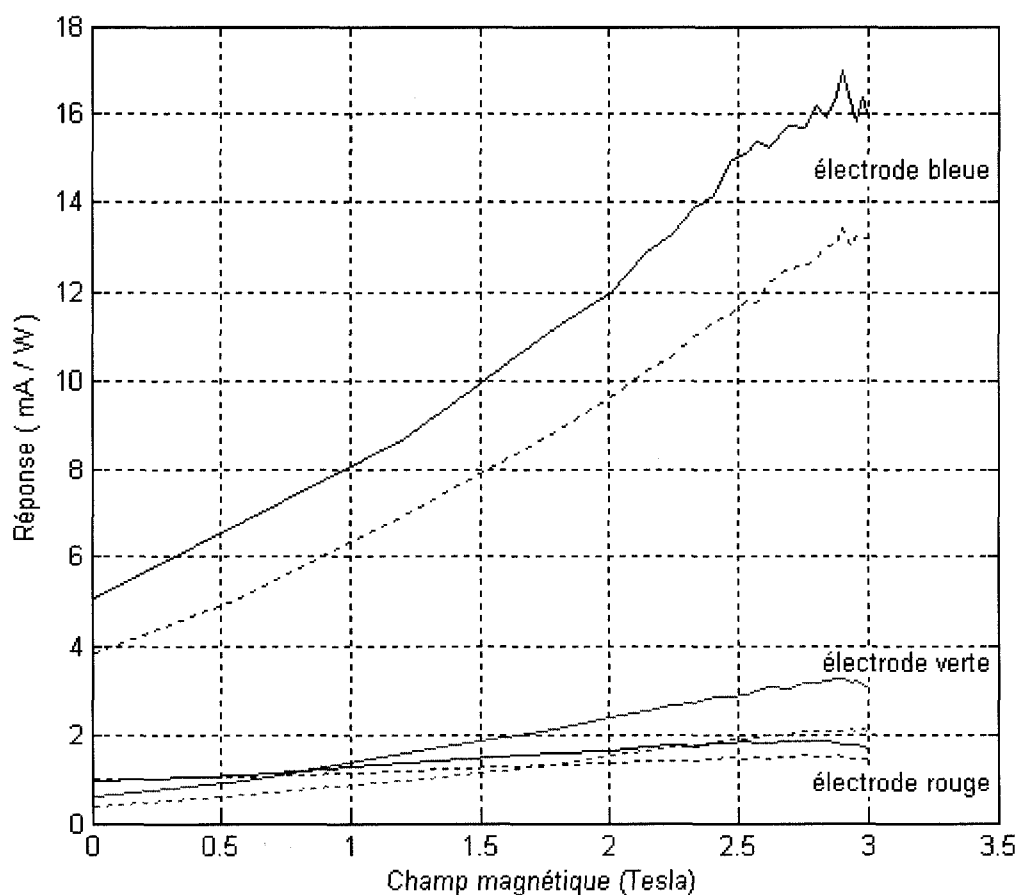


Figure 4-13: La réponse absolue du capteur d'images en fonction du champ magnétique (traits pleins (laser rouge), traits brisés (laser vert)).

Sur la figure 4-13, les traits pleins représentent le comportement des électrodes du capteur d'images en fonction du champ magnétique lorsque le capteur d'images est illuminé par un faisceau laser rouge, alors que ceux en trait brisé représentent celui du même capteur, lorsque celui-ci est illuminé par un faisceau laser vert. Dans le cas du

laser rouge, le capteur d'images est plus sensible que dans le cas du laser vert à cause de l'efficacité quantique différente.

La figure 4-13, confirme également les phénomènes observés dans les images de la figure 4-10 et 4-11. En l'absence du champ magnétique, les trois électrodes collectent les charges générées dans le pixel qui se déplacent suivant la trajectoire du champ électrique dont la majorité est récoltée par le contact N+. L'électrode bleue récolte plus de charges au détriment des deux autres. Également, on remarque que la sensibilité du capteur augmente avec le champ magnétique, et qu'un maximum est atteint à environ 2.9 Tesla. L'origine de ce point maximal est illustrée sur la figure 4-14 ci-dessous :

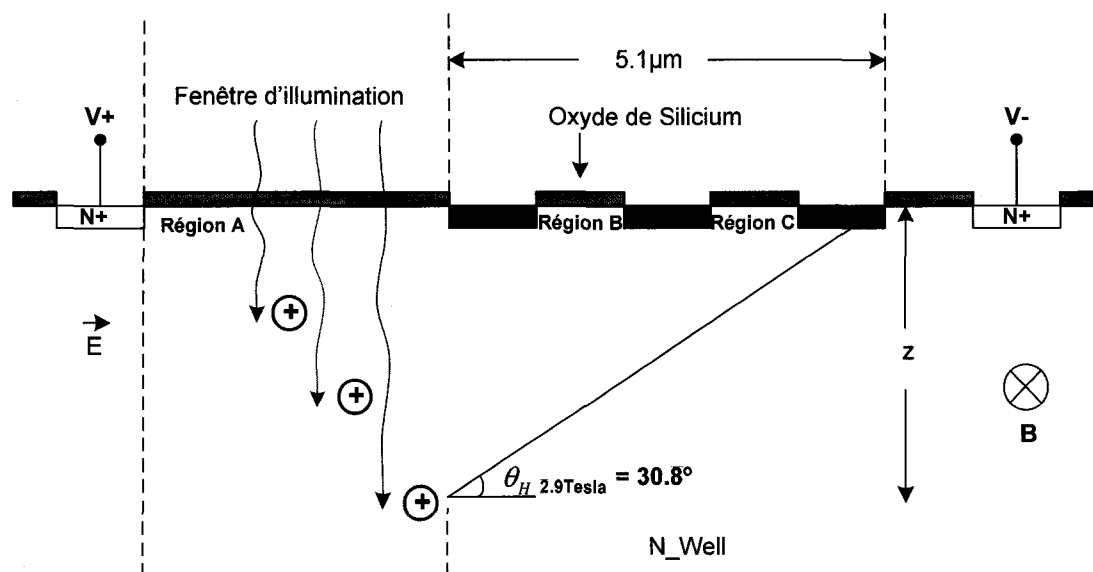


Figure 4-14: Le comportement du capteur à la réponse maximale.

Lorsque aucun champ magnétique n'est appliqué au capteur, les charges générées se déplacent dans la direction du champ électrique, E , et la majorité d'entre eux, est récoltée par le contact N+ au potentiel V-. Lorsqu'un champ magnétique B est appliqué, il a pour effet de dévier les charges progressivement du contact N+ vers les trois électrodes P+ de lecture, d'où l'augmentation du signal vidéo.

À environ 2.9 Tesla (réponse maximale), selon l'équation (2-11) l'angle de déviation θ_H est de 30.8° avec $\mu_n^* = 1610 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ et $\mu_p^* = 350 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. Connaissant la distance entre l'extrémité droite de l'électrode rouge et le début de la fenêtre d'illumination qui est de $5.1\mu\text{m}$ (voir figure 4-14), nous pouvons estimer la profondeur z d'un trou collecté à cet angle de déviation. Tel qu'illustré sur la figure 4-14, la profondeur $z = 5.1\mu\text{m} * \tan(30.8^\circ) = 3.04\mu\text{m}$. En comparant cette profondeur de $3.04\mu\text{m}$ avec celle du puits-N de $3\mu\text{m}$ (les données fournies par la compagnie de fabrication), nous permet de conclure qu'à cette valeur 2.9T de champ magnétique, tous les trous générés dans le puits sont collectés. Au-delà de 2.9T, les charges sont repoussées vers les régions frontalières entre le silicium et l'oxyde de silicium, riches d'impuretés et de défauts qui favorisent la recombinaison des paires électron-trou au détriment de la sensibilité. On assiste alors à une chute de sensibilité étant donné qu'il ne reste plus de charges à collecter dans le puits. C'est cette recombinaison principalement au niveau de la région A, située sous la fenêtre d'illumination, qui est responsable de la perte de sensibilité du pixel de cette innovation comparativement à celle de la photodiode fabriquée avec le même procédé CMOS, malgré que l'espace de collection de charges du pixel de ce nouveau concept est plus volumineux que celle des photodiodes.

Afin d'analyser la capacité du capteur à distinguer la longueur d'onde (la couleur) du rayon incident, la figure 4-15 ci-dessous, présente les mêmes résultats de la figure 4-13, mais cette fois-ci, la réponse du capteur d'images est présentée en valeur relative (augmentation en pourcentage) pour chaque valeur du champ magnétique appliqué et pour les deux longueurs d'onde. 635 nm pour laser rouge (traits pleins) et 532nm pour le laser vert (traits brisés).

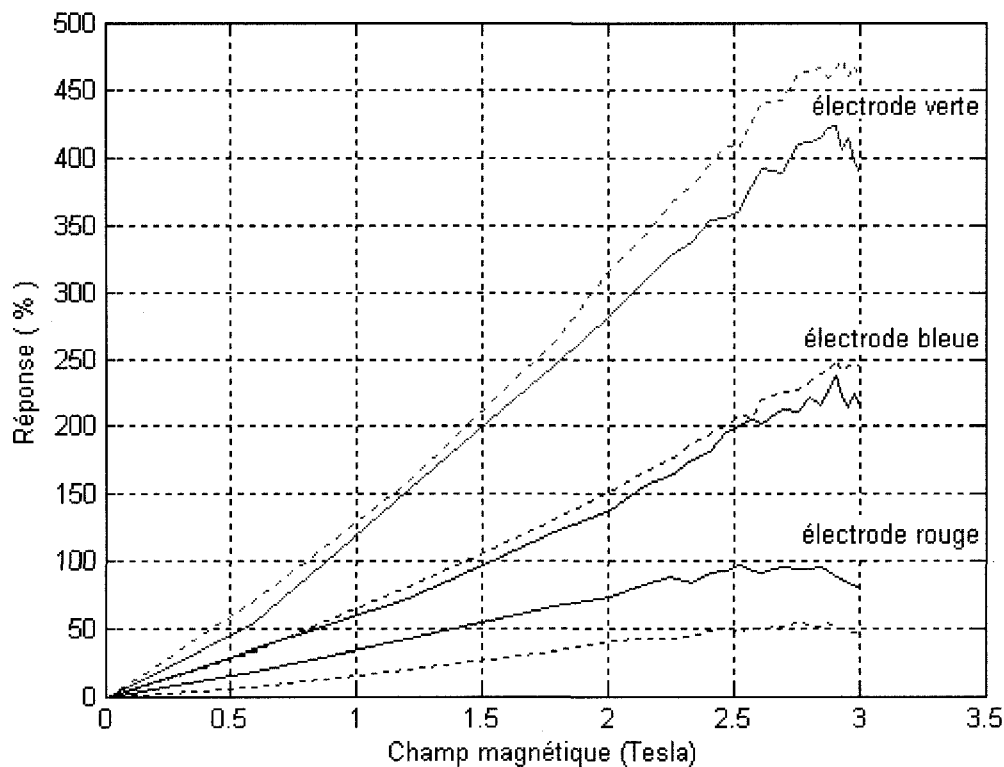


Figure 4-15: Augmentation de la réponse du capteur d'images en fonction du champ magnétique (traits pleins (laser rouge), traits brisés (laser vert)).

Selon la figure 4-15, le signal de l'électrode bleue répond presque de la même façon aux deux longueurs d'ondes, alors que celui de l'électrode verte augmente plus rapidement lorsque le capteur est illuminé par un faisceau laser vert comparé à un faisceau laser rouge, et vice versa, le signal de l'électrode rouge augmente plus sous l'illumination d'un faisceau laser rouge qu'un faisceau laser vert. Effectivement, ceci était prévisible, car, lorsqu'un champ magnétique suffisant pour dévier les charges générées dans le puits est appliqué au capteur, l'électrode rouge se trouve avantagée pour collecter les trous générés au fond du puits. Ces derniers sont générés par le faisceau laser rouge qui pénètre plus profondément qu'un faisceau laser vert. Et vice versa, l'électrode verte se trouve avantagée par un faisceau laser vert qui génère la grande partie des charges au milieu et en haut du puits étant donné que le faisceau laser vert pénètre moins que son homologue rouge.

Donc, les résultats de la figure 4-15 confirment la capacité de ce nouveau concept de détection de la couleur à collecter les charges générées par la radiation lumineuse dans le puits, et à distinguer la longueur d'onde du rayon incident générateur de ces charges.

B. Mesure de la linéarité

Tel que mentionné auparavant dans le chapitre 1, une image est le résultat des différences d'intensités lumineuses réfléchies par l'objet et capturées par l'imageur (capteur d'images). D'où l'importance de mesurer la proportionnalité entre le flux incident et la valeur du signal obtenue à la sortie du capteur d'images.

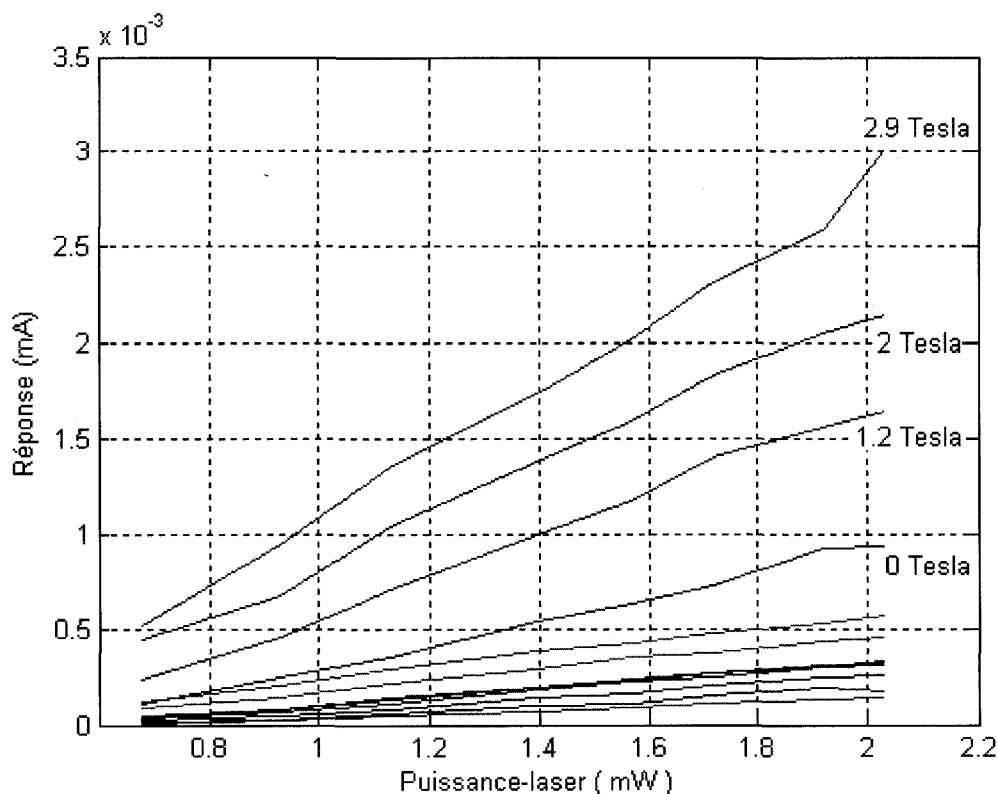


Figure 4-16: Mesure de la linéarité du capteur pour différentes valeurs de champ magnétique.

La figure 4-16, représente le comportement du capteur d'images face aux différentes puissances lumineuses. Ceci a été réalisé en variant la puissance du faisceau laser

illuminant le capteur et en récoltant le courant total de tous les pixels de la matrice du capteur à chaque puissance du faisceau lumineux. Ces mesures ont été effectuées pour quatre différentes valeurs de champ magnétique afin d'étudier l'effet de celui-ci sur la linéarité du capteur.

Afin d'analyser la linéarité de la figure 4-16, un lissage linéaire $y = p1 * x + p2$ est superposé aux données mesurées de la figure 4-16 et des calculs de résidu ont été effectués. Rappelons que ce dernier (le résidu) caractérise la différence entre les données mesurées et celles obtenues par le calcul. Dans notre cas, il renseigne sur la qualité du lissage (linéarité) de la courbe. Plus le résidu est faible, meilleur est le lissage.

Tableau 4-1 : Calcul de résidu.

| Champ magnétique | Électrode bleue (résidu) | Électrode verte (résidu) | Électrode rouge (résidu) |
|------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0 Tesla | $6.4767 * 10^{-5}$ | $1.3036 * 10^{-5}$ | $2.9009 * 10^{-5}$ |
| 1.2 Tesla | $7.8768 * 10^{-5}$ | $1.8263 * 10^{-5}$ | $2.5293 * 10^{-5}$ |
| 2 Tesla | $10.507 * 10^{-5}$ | $2.4794 * 10^{-5}$ | $2.419 * 10^{-5}$ |
| 2.9 Tesla | $18.514 * 10^{-5}$ | $1.879 * 10^{-5}$ | $1.2782 * 10^{-5}$ |

Selon les résultats du tableau 4-1, on remarque que le courant de sortie du capteur pour les trois électrodes a une conversion proportionnelle (linéaire) aux photons incidents atteignant la surface du capteur et ce pour les quatre valeurs de champ magnétique employées. Ce capteur d'images est donc approprié pour les applications en photométrie où la linéarité constitue une caractéristique importante.

4.3.2 Effets non idéals dans l'image de sortie

L'analyse du comportement non idéal du capteur d'images constitue une étape cruciale pour comprendre le nouveau concept, et les effets non idéals seront tenus en considération lors de la réalisation de prototypes futurs

a. Propagation des charges entre les pixels voisins

En analysant l'image couleur (rouge, verte, et bleue) de la figure 4-10b, on remarque qu'à la dixième rangée de la matrice de pixels, l'électrode rouge est la plus intense par rapport aux deux autres électrodes verte et bleue. Et que cette électrode rouge ne change pas d'intensité contrairement aux électrodes verte et bleue sous l'effet du champ magnétique. La figure 4-17 ci-dessous, illustre ce phénomène en l'analysant au niveau du pixel par l'affichage des oscillogrammes de la dixième rangée seulement.

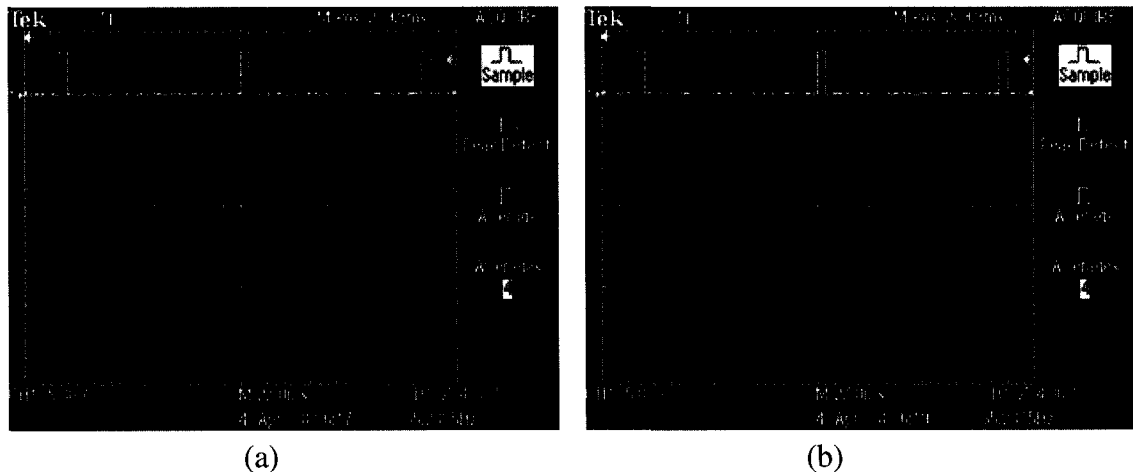


Figure 4-17: La sortie de la dixième rangée du capteur d'images pour un faisceau laser rouge. a) Les sorties des trois électrodes sans champ magnétique. b) Les sorties des trois électrodes avec un champ magnétique.

Tel qu'illustré sur la figure 4-17a, sans champ magnétique, les pixels de l'électrode rouge de cette dixième rangée sont plus intenses que les pixels des électrodes verte et bleue. À la figure 4-17b, les pixels de l'électrode rouge restent insensibles au champ

magnétique par rapport aux électrodes verte et bleue. Ceci contredit le comportement des pixels des autres rangées du capteur tel qu'a été démontré dans les paragraphes précédents qui concluaient que l'électrode bleue est la plus sensible par rapport aux électrodes verte et rouge, étant donné qu'elle est la plus proche de la fenêtre d'illumination où les charges sont générées, et ainsi obstruant les deux autres électrodes. Cet effet contraire observé seulement à la dixième rangée, est associé d'une part à la façon dont on polarise les pixels d'une rangée (application d'un champ électrique dans un pixel), et d'autre part, à la structure (cohabitation) des pixels sur une même colonne, tel qu'illustré sur la figure 4-18 ci-dessous :

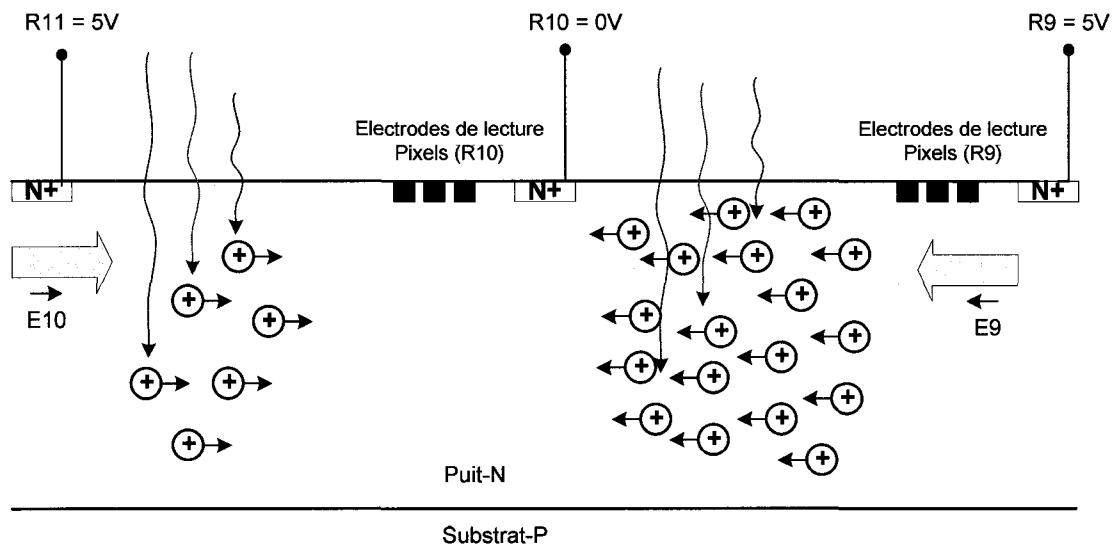


Figure 4-18: propagation de charges entre deux pixels voisins.

La figure 4-18 représente l'état des pixels de la neuvième et la dixième rangée de la région illuminée de la matrice, ainsi que leur état de polarisation. Tel que décrit à la section 3.2 du chapitre 3 (figure 3-4), ce sont les pixels de la rangée dont la tension de polarisation est minimale (0V) qui sont lus. Donc, dans le cas de la figure 4-18, la lecture se fait sur les pixels de la dixième rangée.

En l'absence de champ magnétique, les charges générées dans les pixels de la dixième rangée par le faisceau lumineux, suivent la trajectoire du champ électrique E10, et sont collectées par les trois électrodes de lecture de la dixième rangée. Cependant, les charges générées dans les pixels de la neuvième rangée, sont déplacées par le champ électrique E9 et envahissent les pixels de la dixième rangée sous lecture. Remarquez que, dans le cas de la contribution des charges générées dans les pixels de la neuvième rangée et collectées par les électrodes de la dixième rangée, l'électrode rouge est cette fois-ci la plus proche de la fenêtre d'illumination de la dixième rangée. Par conséquent, c'est cette électrode qui récolte la majorité de ces charges, d'où l'effet non attendu de la figure 4-17a en l'absence de champ magnétique.

Tel qu'on peut le constater sur la figure 4-17b, l'application d'un champ magnétique n'a pas d'effet remarquable sur l'électrode rouge, car la majorité des charges de cette électrode, ne vient pas de son propre pixel (de la dixième rangée), mais du pixel voisin de la neuvième rangée. Le champ magnétique fera en sorte que la majorité des charges en provenance des pixels de la rangée précédente (la neuvième rangée dans notre cas) soient collectées par l'électrode de contact N+ de la dixième rangée, mais il y aura toujours les charges excédentaires qui se propagent par diffusion vers l'électrode rouge de la dixième rangée.

Donc, étant donné qu'il n'y a aucune délimitation physique entre les pixels d'une même colonne puisqu'ils sont tous implémentés dans le même N-well, et que théoriquement l'angle de Hall θ_H , dû au champ magnétique, assurera cette délimitation entre les pixels voisins, le prototype rencontre un problème de propagation des charges générées dans un pixel vers un autre pixel voisin. Souvent, ceci se manifeste sous une intense illumination d'un pixel par rapport aux pixels voisins.

b. Effets de transistors de sélection sur le signal vidéo

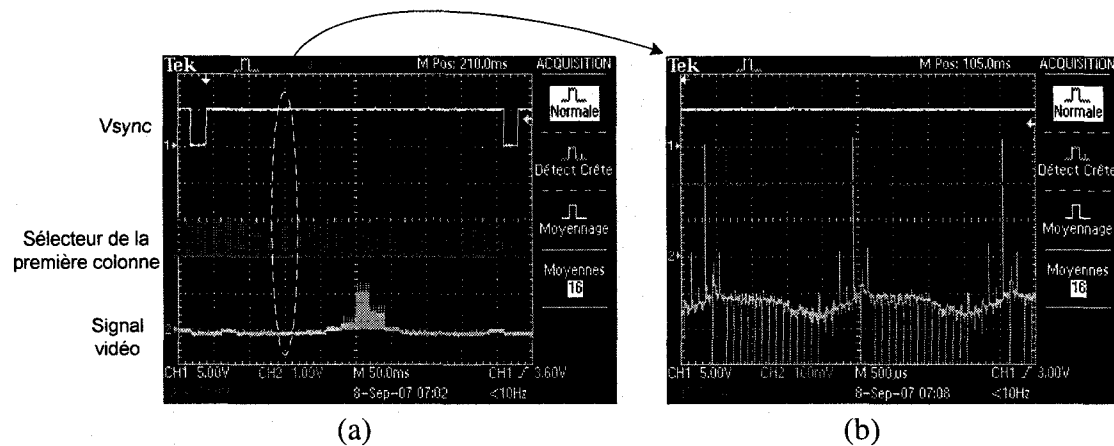


Figure 4-19 : a) Signal vidéo de l'électrode bleue lorsque la matrice est illuminée. b) Région des rangées non illuminées, et sélectionnée sur la figure (a) agrandie.

La figure 4-19b représente la région des rangées non illuminées de la figure 4-19a agrandie. On y remarque qu'il y a un signal DC négatif assez important, de l'ordre de 200mV. C'est un signal dû au faisceau lumineux qui ne provient pas des pixels du capteur d'images, et dont le courant circule dans le sens opposé du courant de photons provenant des pixels. Cet effet négatif vient du courant de jonction PN des transistors NMOS de sélection de colonnes, tel qu'illustré sur la figure 4-20 ci-dessous.

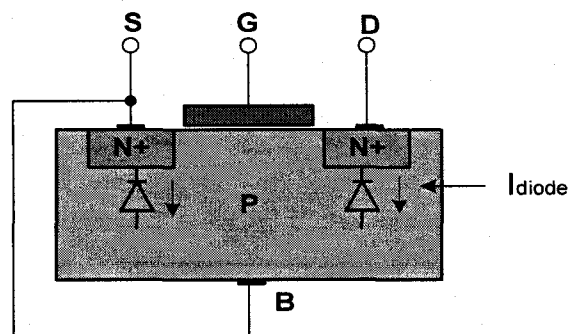


Figure 4-20: La coupe verticale d'un transistor NMOS de sélection.

La combinaison du substrat dopé en P et de la source ou le drain dopé en N+, forme des diodes PN. Lorsque un photon atteint ces transistors, il en résulte un courant de photons

comme dans le cas de la photodiode. Tel qu'illustré sur la figure 4-20, ce courant de photodiodes résultat I_{diode} , circule dans le sens opposé du courant des pixels, d'où le signal négatif observé sur la figure 4-19b.

Injection de charges:

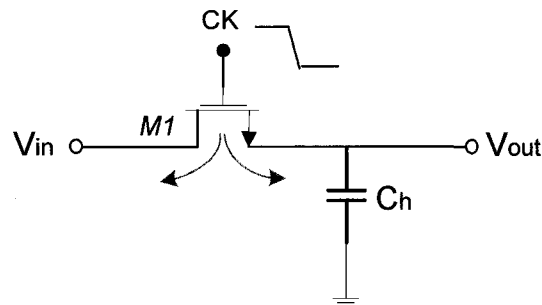


Figure 4-21: L'injection de charges dans un commutateur.

Lors que le transistor MOSFET est utilisé comme commutateur, il existe un canal de charges entre l'interface oxyde-silicium, lors que celui-ci est en mode fermé, afin de garantir $V_{in} \approx V_{out}$. La quantité totale de ces charges mobiles est exprimée par la relation suivante [29] :

$$Q_{ch} = WLC_{OX} (V_{CK} - V_{in} - V_{th}) \quad (4-3)$$

Avec L, la longueur effective du canal, W la largeur du transistor, C_{ox} la capacité de l'oxyde, et V_{th} la tension de seuil du transistor. Et lors que le transistor M1 passe à l'état ouvert, les charges mobiles quittent le canal tel qu'illustré sur la figure 4-21, une partie vers la source, et une autre vers le drain. C'est ce phénomène nommé « *injection de charges* ». Les charges injectées vers le générateur sont absorbées par celui-ci, et ne causant aucune erreur, mais celles injectées dans le bus de sorti s'ajoutent au signal vidéo de sorti sous forme d'une tension emmagasinée par la capacité C_h . Ce signal d'erreur ΔV est exprimé par la relation suivante [29] :

$$\Delta V = \frac{Q_{ch} = WLC_{OX} (V_{CK} - V_{in} - V_{th})}{2C_h} \quad (4-4)$$

Il faut noter que la relation (4-4) présume que les charges Q_{ch} sont réparties équitablement entre la source et le drain, ce qui n'est pas le cas dans la vie pratique. En réalité, la fraction de charges injectées vers la source ou vers le drain est aussi complexe que la simple division par deux. Elle dépend de plusieurs paramètres.

Dans le cas de ce capteur d'images prototype, cet effet « *l'injection de charges* » est visible également dans les images ou les oscillogrammes correspondants des figures 4-10, 4-11, et 4-19. Il se manifeste par la présence des traits verticaux (des lignes) séparant les pixels d'une colonne de la matrice à une autre.

4.4 Conclusion

Les résultats de test du capteur d'images prototype qui ont été présentés dans ce chapitre, prouvent le fonctionnement du concept de cette nouvelle méthode de détection de la lumière. La réponse du capteur d'images par rapport au champ magnétique confirme l'augmentation de la sensibilité du capteur, sous l'effet de la déviation de charges par le champ magnétique. Répondant différemment aux deux différentes longueurs d'ondes (le laser rouge et le laser vert), ce nouveau concept prouve sa capacité de discriminer la longueur d'onde du rayon incident, et ainsi agir comme un détecteur de couleur sans filtre optique. La conversion linéaire des photons incidents en courant a été réalisée pour différentes valeurs de champ magnétique, confirmant l'utilité de ce nouveau type de photodétecteur pour des applications de capteurs d'images. Quelques effets non idéaux affectant le capteur d'images prototype, notamment la propagation des charges entre les pixels voisins et l'effet de transistors de sélection sur le signal vidéo ont été également examinés. Par ailleurs, d'autres sources de bruits affectent ce capteur : le bruit spatial lié à la non-uniformité du processus de fabrication, le courant de fuite, et le bruit temporel lié à la fluctuation dans le temps des paramètres électriques du capteur d'images, ne font pas partie de ce mémoire, mais qui seront évalués dans un travail subséquent.

Conclusion générale

Ce mémoire constitue un premier pas vers la validation du concept de détection de la lumière, aboutissant à un capteur d'images couleur sans filtre optique. Un capteur d'images prototype réalisé en technologie CMOS et implémentant ce nouveau concept de détection de la lumière a été testé. Dans cette section, nous résumons le travail qui a été fait, ainsi que quelques suggestions d'amélioration à apporter dans le futur.

- **Revue générale des chapitres**

Différents points ont été présentés et analysés dans les différents chapitres. Une revue résumée est ici présentée afin de donner une idée générale de ce qui a été traité dans chaque chapitre de ce mémoire.

Dans le chapitre 1, la méthode de détection d'images a été examinée. Les paramètres physiques du semi-conducteur (le silicium) utilisé pour convertir les photons en signal électrique, ainsi que deux principaux éléments photosensibles les plus présents dans les capteurs d'images actuels, à savoir la capacité MOS et la photodiode, ont été analysés. Par après, ces éléments photosensibles ont été extrapolés vers leurs capteurs d'images correspondant, notamment les capteurs d'images CMOS et les capteurs d'images CCD. La comparaison de ces derniers, a montrée que les capteurs d'images CMOS représentent un choix de préférence pour le futur, grâce à sa capacité d'intégrer les différents modules de traitement d'images sur le même substrat que le capteur lui-même, tout ça avec une faible consommation de puissance par rapport à son rival CCD. Finalement, un survol de deux méthodes les plus utilisées actuellement dans les capteurs d'images pour reconnaître la longueur d'onde du faisceau incident (la couleur) : les filtres optiques employant le patron de Bayer et le capteur de Foveon utilisant trois photodiodes superposées, ont été présentées.

Le chapitre 2 et le chapitre 3 ont présenté l'architecture, ainsi que les différentes méthodes adoptées pour lire la matrice des pixels du capteur d'images prototype. Les différentes notions théoriques expliquant le nouveau principe de détection de la lumière et permettant ainsi la réalisation du capteur d'images prototype ont été examinées dans le chapitre 2. La polarisation et la lecture du capteur d'images ont été examinées en détail dans le chapitre 3. Il a été montré que le capteur d'images prototype est composé de trois principales parties, à savoir la matrice des pixels, le circuit de balayage, et les amplificateurs de sortie. Une polarisation et une lecture progressive de la matrice des pixels ont été réalisées via le circuit FPGA. Une attention particulière a été portée à la lecture de différents pixels de la matrice afin d'éviter la corruption du signal vidéo résultant, soit en comptabilisant plus qu'une fois le même pixel, ou bien en n'excédant pas aux certains pixels composant la matrice. Quant aux amplificateurs de sortie, ils ont été réalisés à l'extérieur du circuit intégré du capteur, par les composants discrets commerciaux. Finalement, l'interfaçage du capteur d'images avec l'ordinateur via la carte de capture Corona-II, a été réalisé pour faciliter le test du capteur, car il permet d'afficher et analyser l'image vidéo à temps réel sur l'écran de l'ordinateur.

Le chapitre 4, a présenté en long et en large les différentes techniques utilisées pour tester physiquement le capteur d'images prototypes avec les résultats expérimentaux obtenus au laboratoire à l'appui. Un banc de test approprié a été développé pour caractériser le capteur d'images prototype. Celui-ci comprend un montage mécanique de l'électro-aimant pour fournir le champ magnétique, un montage optique pour pouvoir concentrer une image de l'environnement réel sur la surface du capteur, et un montage électrique composé de circuits imprimés sur lesquels le circuit de balayage et le capteur sont montés. Les tests ont été facilités par l'affichage de l'image à temps réel à l'ordinateur. Un survol sur quelques effets non idéaux affectant le capteur d'images prototype a été également examiné.

- **Suggestions de travaux futurs**

Malgré les résultats de test présentés dans les chapitres qui précèdent, un certain nombre de suggestions possiblement à apporter dans le travail futur ont été notées, et celles-ci font l'objet de la discussion suivante :

Évidemment, l'étape suivante serait d'analyser le comportement du capteur lors que celui-ci capture les rayons provenant d'une image réelle de l'environnement (la lumière blanche). La capture de l'environnement réel pourra nous révéler plus de renseignements importants. Par exemple, ils pourront nous indiquer à quel niveau le capteur est capable de discriminer les couleurs de l'image, et également si le niveau de bruits observé dans les tests précédents est adéquat pour être capable de capturer une scène réelle. Cependant, selon les performances du capteur mesurées et présentées dans les chapitres précédents, il va falloir d'augmenter sa sensibilité pour être capable de capturer une scène réelle de l'environnement. Ceci pourra être réalisé en éliminant cette recombinaison des paires électron-trou dans la région frontalière entre le silicium et l'oxyde de silicium sous la fenêtre d'illumination, et en éliminant la contribution nuisible de transistors de sélection en les couvrant avec une couche impénétrable par la lumière.

Les mesures concernant le comportement du capteur en fonction du champ électrique appliquée au pixel s'avéraient importants, mais à cause de la présence du circuit d'inverseur qui sépare le signal de polarisation des pixels d'une rangée à celui d'activation de cette même rangée, il nous a été impossible de varier le champ électrique appliqué au pixel, sans toutefois affecter le reste de la matrice. Donc, pour les capteurs d'images ultérieurs, la séparation de ces deux signaux : celui de polarisation des pixels d'une rangée et celui qui l'active, permettra d'étudier l'influence du champ électrique appliqué au pixel. Il nous renseignera sur la valeur minimale du champ électrique nécessaire pour le fonctionnement du concept, et de cette façon réduire la puissance consommée par la matrice des pixels. Également, une reconfiguration de la structure du

pixel s'avère nécessaire, afin de minimiser le champ magnétique nécessaire pour discriminer les couleurs.

L'intégration du circuit numérique de balayage et les amplificateurs transimpédance sur le même substrat que le capteur d'images, serait l'étape logique qui permettrait de minimiser le bruit du signal vidéo avant d'être transféré à la carte de capture. Une attention particulière sur la minimisation des capacités parasites et l'utilisation de techniques de lecture différentielle sur les capteurs d'images ultérieurs pourront contribuer à la réduction du bruit.

Une fois le capteur d'images sera confronté à l'environnement réel, et que les améliorations nécessaires pour avoir une image de qualité préliminaire seront apportées, l'étape suivante serait d'augmenter la résolution du capteur. L'usage du procédé CMOS avancé de petite taille, pourrait augmenter la résolution du capteur d'images, tout en gardant la surface totale du capteur assez petite. Également, l'emploi du procédé CMOS standard, permettrait l'intégration d'un convertisseur A/N et ainsi faciliter l'interfaçage du capteur avec un composant numérique externe. On pourra également intégrer le module de traitement du signal analogique, et numérique sur le même substrat que le capteur d'images lui-même.

Finalement, les résultats de tests présentés dans ce mémoire, indiquent qu'un capteur d'images basé sur ce nouveau concept de détection de la lumière verra le jour bientôt.

Bibliographie

- [1] AUDET, Y. « Color Image Sensor » Patent Cooperation Treaty/CA2007/000997
- [2] BAER, R.L., HOLLAND, W.D., HOLM, J., VORA, P.L.(1999). « A Comparison of Primary and Complementary Color Filters for CCD-based Digital Photography », Proc. SPIE Electronic Imaging Conference, p 16.
- [3] BAYER, B.E. « Color imaging Array » US patent 3, 971, 065, 1976
- [4] CHEAK SECK FAI. (2004). « Detecting Near-IR Wavelengths with the Foveon Image Sensor », Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California.
- [5] CHEUK WAI WONG, J. (2001). « CMOS Sample-and-Hold Circuits », ECE 1352 Reading Assignment, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto.
- [6] CHOUIKHA, B. et al, «Photodetector Based on Buried Junctions and a Corresponding Method of Manufacture » US patent 5,883,421,1999
- [7] COGHILL, J. (2003). « Digital Imaging Technology 101 », DALSA Corp.
- [8] DECOSTER, D., HARARI, J. (2002). « Détecteurs Optoélectroniques », Paris, Hermès Science Publications, p. 33-44.
- [9] DELEPORTE, E., DUMEIGE, Y. (2002). « Effet Hall dans les Semiconducteurs », Ecole Normale Supérieure de Cachan.
- [10] DESMOND YU HIN CHEUNG. (2002) « CMOS Active Pixel Sensor Designs for Fault Tolerance and Background Illumination Subtraction », Thesis, Simon Fraser University.
- [11] FINLAYSON, G., HORDLEY, S. and HUBEL, P. M. (1998). « Recovering Device Sensitivities with Quadratic Programming », IS&T/SID Sixth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, Scottsdale, Arizona, November p. 90-95

- [12] GAY et al, « Vertically Integrated Solid State Color Imager » US patent 4,581,625,1986
- [13] HUBEL, P.M. (1999). « Image Color Image Quality in Digital Cameras », PICS: Image Processing, Image Quality, Image Capture, Systems Conference, Savannah, Georgia, p. 153-157.
- [14] HUBEL, P.M., SHERMAN, D. and FARRELL, J.E. (1994). « A Comparison of Methods of Sensor Spectral Sensitivity Estimation », 2nd IS&T/SID Color Imaging Conference Scottsdale, Arizona, p. 45-48
- [15] ISHIHARA, Y., TAKEUCHI, E., TERANISHI, N., KOHONO, A., AIZAWA, T., ARAI, K., SHIRAKI, H. (1980). « CCD Image Sensor for Single Sensor Color Camera », ISSCC Digest of Technical Papers, p.24-25.
- [16] KLEINFELDER, S., LIM, S., LIU, X. and EL GAMAL, A. (2001). « A 10 000 frames/s CMOS Digital Pixel Sensor », IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol 36, no.12, p.2049-2058.
- [17] KOSONOCKY, W., CARNES, J. (1971). « Charge-Coupled Digital Circuits », ISSCC Digest of Technical Papers, p.162-163.
- [18] LARRY, B., MASTEN. (1981). « Understanding Optronics », Texas Instrument Learning Center.
- [19] LYON, R. F., and HUBEL, P. M. (1999). « Eyeing the Camera: into the Next century », IS&T/SID Tenth Color Imaging Conference, Albuquerque.
- [20] MACIEJKO, R. (2002). « Optoélectronique », École Polytechnique de Montréal, p.380-390.
- [21] Matrox Electronic Systems Ltd, (2005) « Matrox Intellicam User Guide », Version 8.0, Manual no.10521-301-0800,
- [22] Matrox Electronic Systems Ltd. (2001). « Matrox Corona-II: *Installation and Hardware Reference* », Manual no.10730-201-0100,
- [23] MERRILL, R.B. « Color Separation in an Active Pixel Cell Imaging Array Using a Trip-Well-Structure » US patent 5, 965, 875, 1999

- [24] MULLER, R.S., HOWE, R. T., SENTURIA, S. D., SMITH, R. L., and WHITE, R. M. (1991). « Microsensors », IEEE Electron Devices Society, p.391.
- [25] NAKAMURA, J. (2006). « Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras », Ed. Boca Raton, FL: CRC Press.
- [26] NOZAKI et al. « Color Sensor » US patent 4,677,289,1987
- [27] OLSEN, T., STEINAR, J. (2002). « An improved image processing chain for mobile terminals », Faculty of Engineering, Agder University.
- [28] ORLY YADID-PECHT and RALPH ETIENNE-CUMMING. (2004) « CMOS Imagers: From phototransduction to Image Processing », Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [29] PAUL M. HUBEL, (2002). « Foveon Technology and the Changing Landscape of Digital Cameras », IS&SPIE, Foveon, Inc, Santa Clara, California, USA.
- [30] RAMANATH. (2001). « Demosaicing Methods for Color Filter Arrays », Journal for electronic Imaging.
- [31] RAZAVI, B. (2000). « Design of Analog CMOS Integrated Circuits », McGraw-Hill Series in Electrical and Computer Engineering, p.420-423.
- [32] ROSE, A. (1973). « Vision: Human and Electronic », David Sarnoff Research Center, Princeton, New Jersey, p.1-26.
- [33] RUSH, A. (2002). « X3 Technology-3 Color Sensors per Pixel », Foveon.Inc.
- [34] SOMMER1, M., RIEVE1, P., VERHOEVEN, M., BOHM, M., SCHNEIDER, B., VAN UFFEL, B., and LIBRECHT, F. (1999). « First Multispectral Diode Color Imager With Three Color Recognition And Color Memory In Each Pixel », IEEE Workshop on CCDs and Advanced Image Sensors, Nagano, Japan.
- [35] STANNOWSKI, B., STIEBIG, H., KNIPP, D., and WAGNER, H. (1999). « Amorphous Silicon Based Unipolar Detector for Color Recognition », IEEE Transactions on Electron Devices, vol.46, no.5, p. 884.
- [36] SZE, S. M. (1994). « Semiconductor Sensors », John Wiley & Sons, Inc. p.305-324.
- [37] Technical Advisory Service for Images. (2007). « Digital Cameras », Advice Paper.

- [38] THEUWISSEN, A. (2003). « 50 Years of Solid-State Image Sensors », ISSCC/50th Anniversary, Dalsa.
- [39] WHITE, M., LAMPE, D., MACK, I., BLAHA, F. (1973). « Characterization of Charge-Coupled Device Line and Area-Array Imaging at Low Light Levels », ISSCC Digest of Technical Papers, p.134-135.
- [40] WODNICKI, R. (1996). « A CMOS Foveated Image Sensor », Master Thesis, Department of Electrical Engineering, McGill University.

Annexe

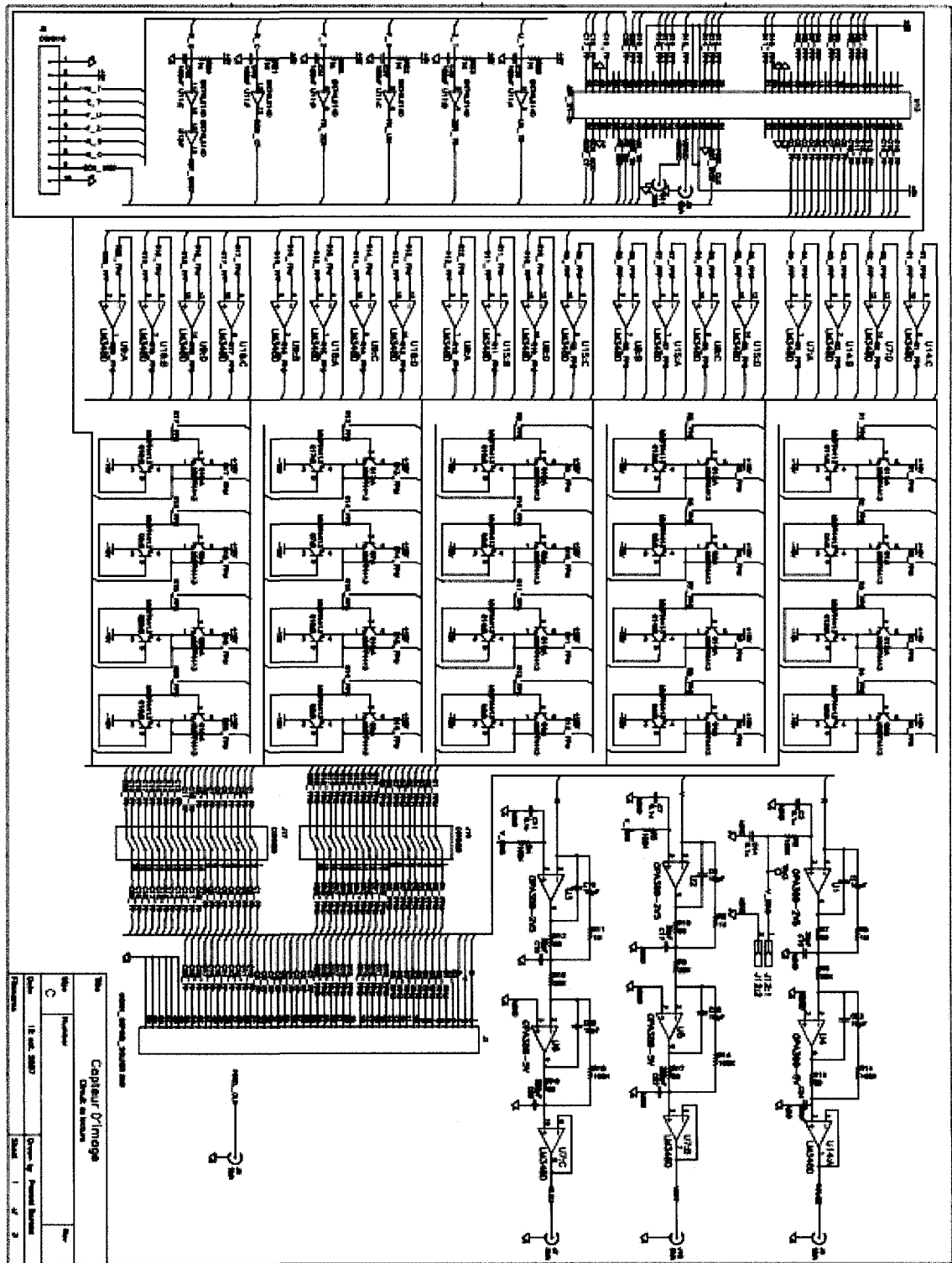


Figure A-1: Le schématique du circuit imprimé 1.

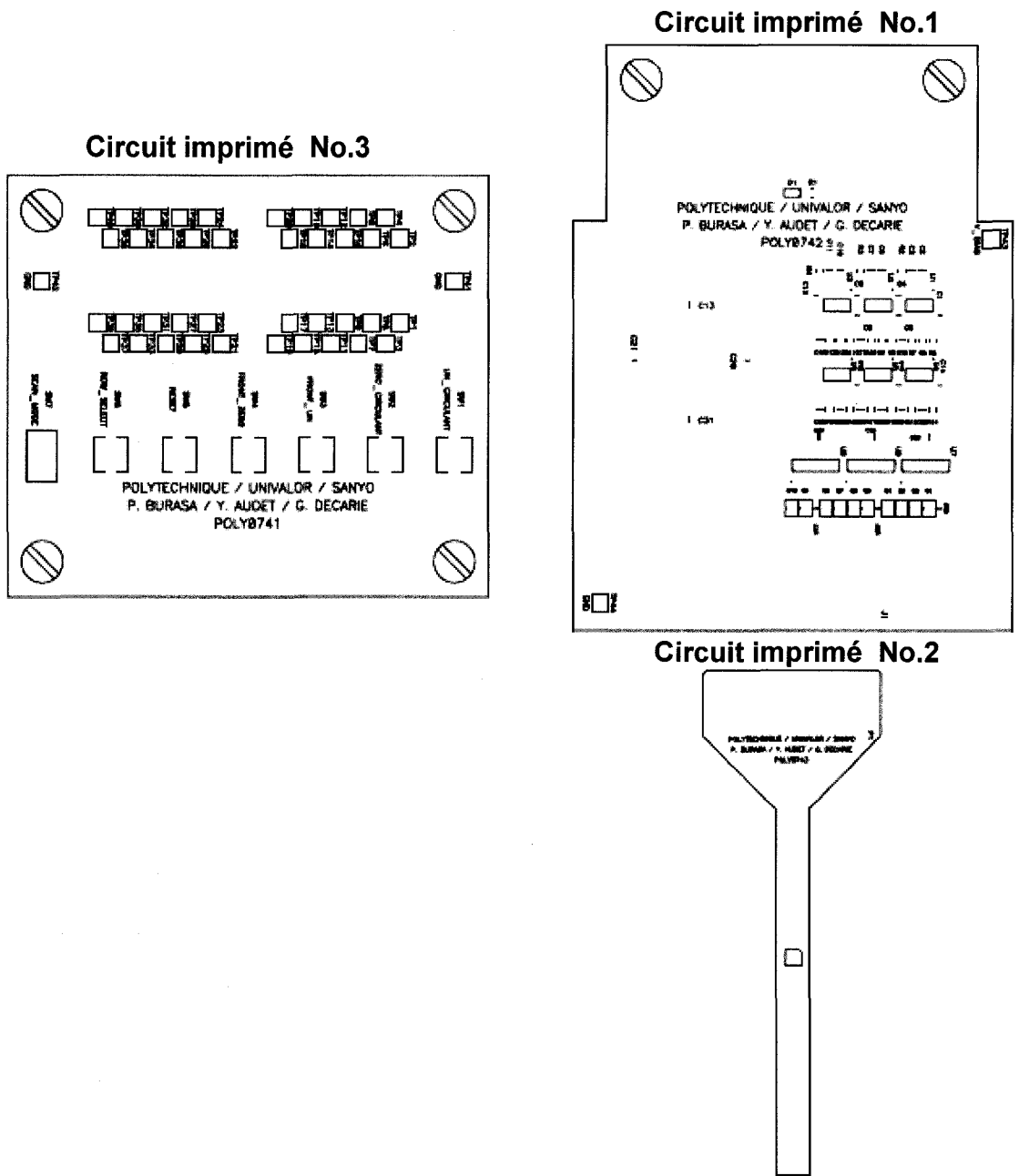


Figure A-3: Le circuit imprimé (vue verso)

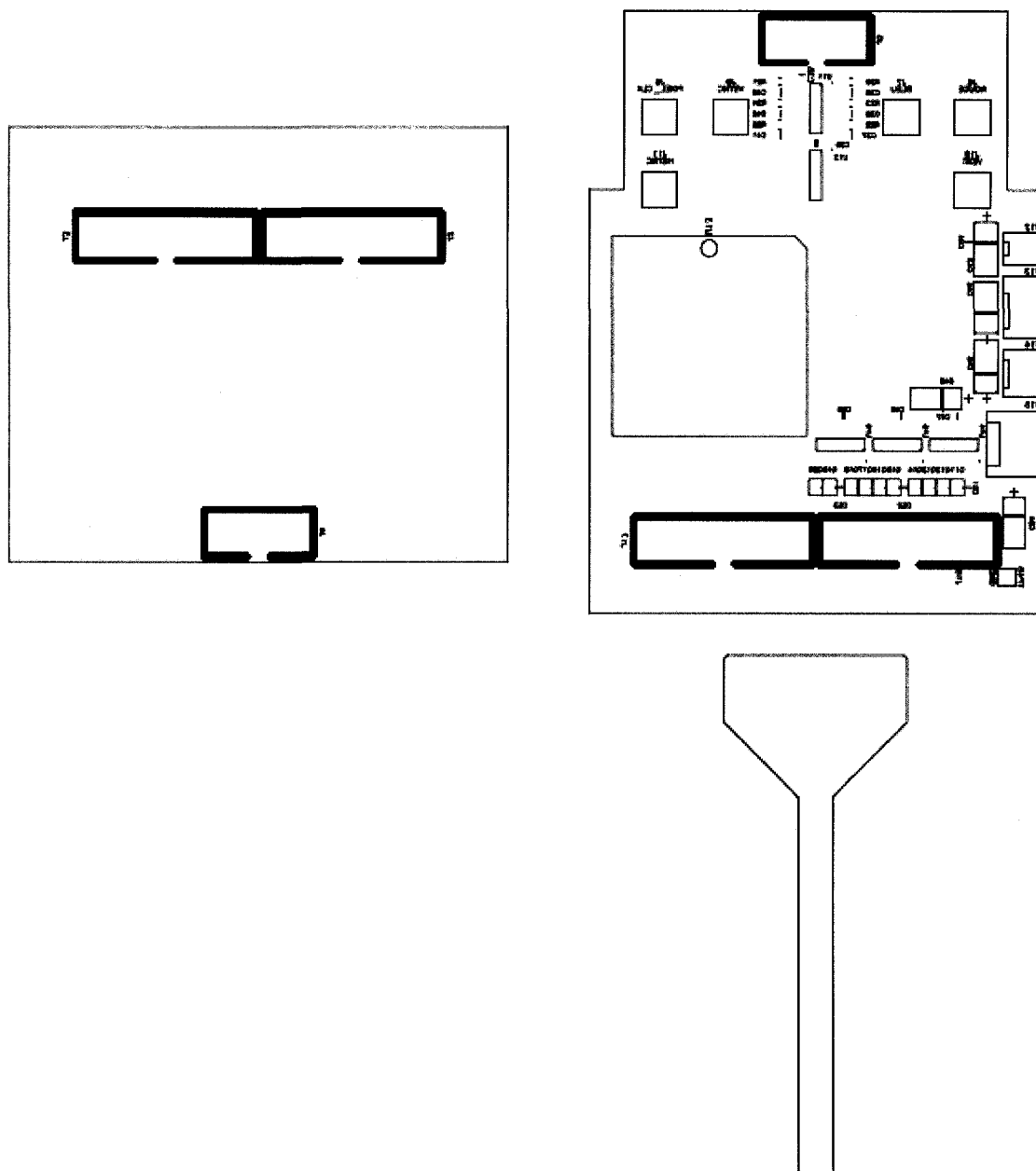


Figure A-4: Le circuit imprimé (vue recto)

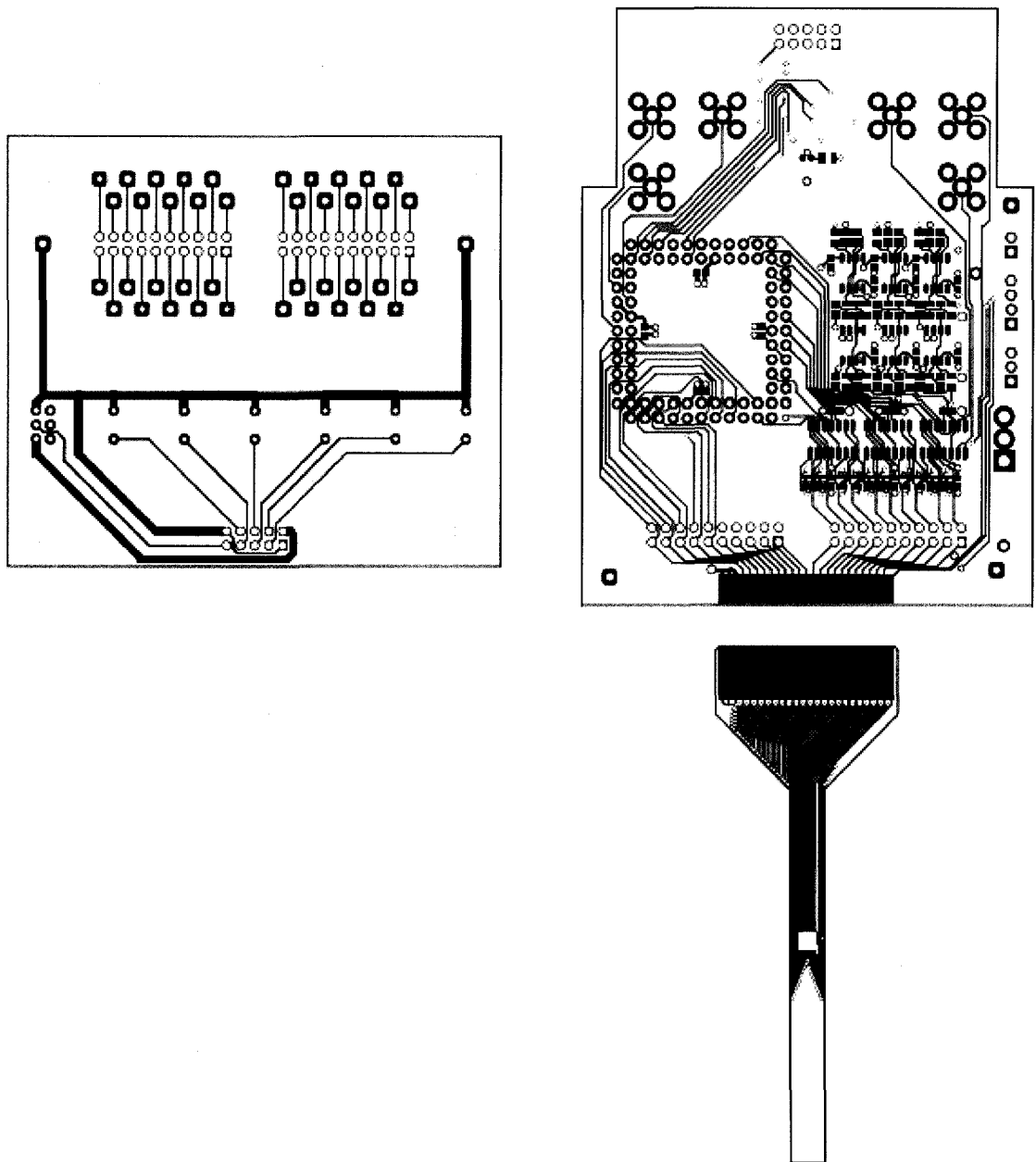


Figure A-5: Le dessin de masque du circuit imprimé (vue verso)

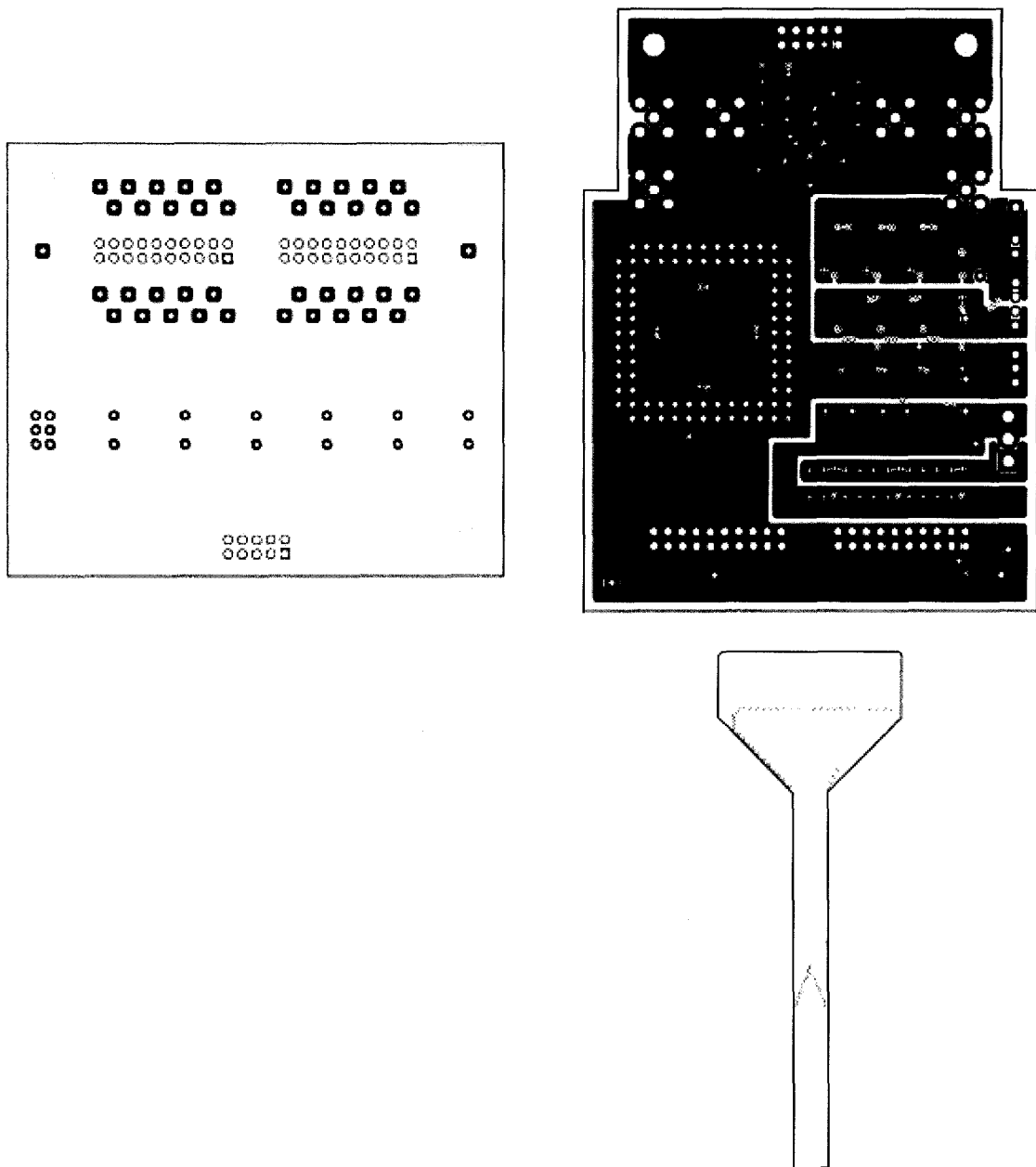


Figure A-6: Le dessin de masque du circuit imprimé (vue milieu, couche d'alimentation).

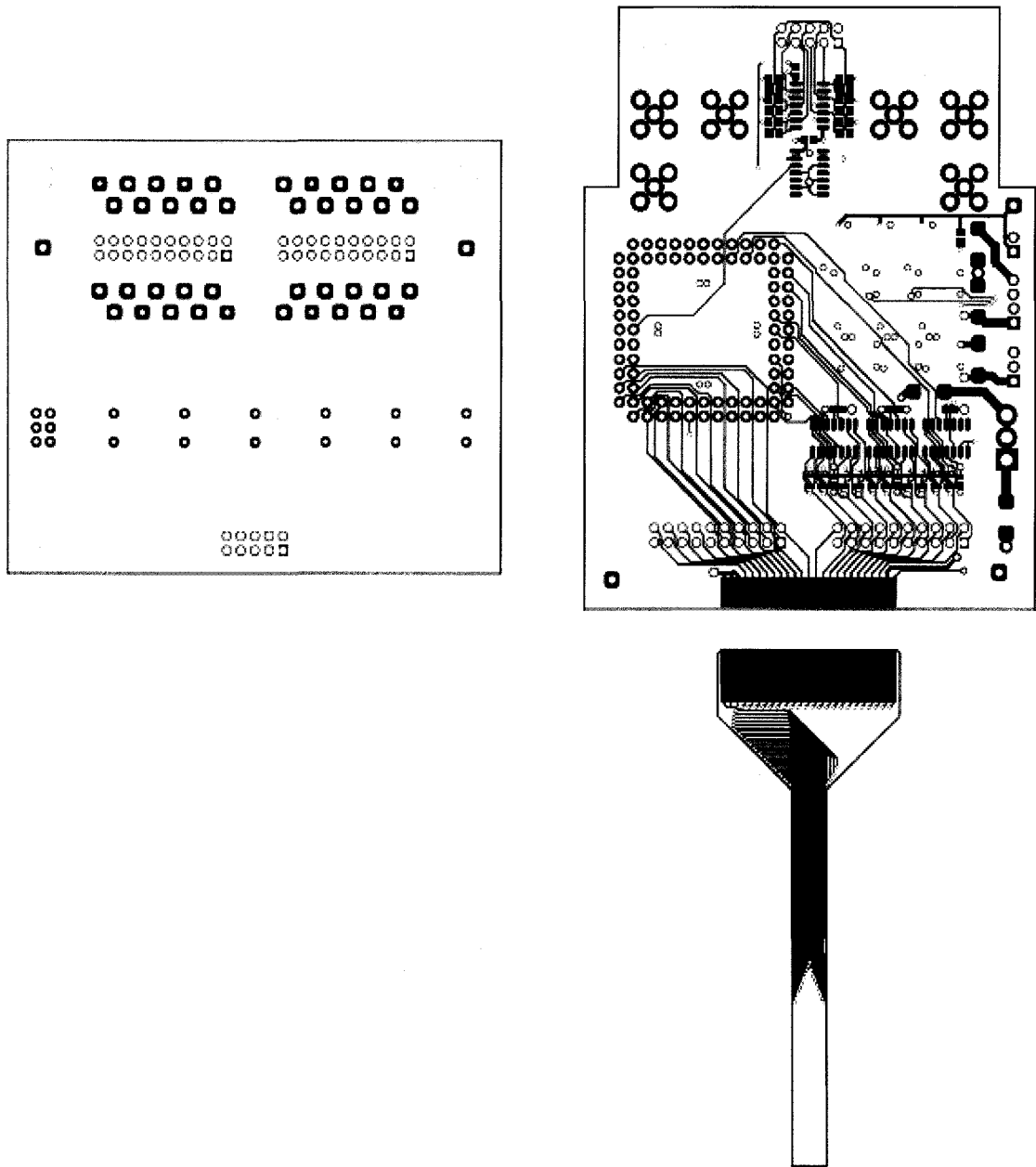


Figure A-7: Le dessin de masque du circuit imprimé (vue recto)