

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

Benzighem Houssam eddine

&

Zemirline Badreddine

Pour l'obtention du diplôme master option Microélectronique,  
Microsystèmes et Conception de Circuits

---

Thème

---

# Étude, conception et simulation d'un capteur CMOS à architecture 3T utilisé dans un dispositif de photocoagulation au laser

---

Proposé par : Mme Naceur.Dj & Mme Bougherira.H

Année Universitaire 2012-2013

## Remerciements

---

Toute notre gratitude, grâce et remerciement au bon Dieu qui nous a donné la force, le courage et la volonté d'élaborer ce travail, nos PARENTS pour leur patience et sacrifice durant des années pour nous voir réussir.

Nous tenons à remercier notre promotrice Mme Naceur pour nous avoir encadré, aidé et encouragé pour mener à bien ce travail. Sans oublier, Mme Bougherira Hamida, Mr Bencherchali, Mme Assad pour leur soutien et conseils qui nous ont incité à aller de l'avant.

Nous remercions également nos collègues Kebbal Ali et Rellam Wahid pour leur aide et l'ensemble des enseignants de l'université de Saad Dahlab (Blida).

## DEDICACE BADRO

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire " Ya Kayoum "

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère. À mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger. Que dieu les garde et les protège.

A mes grands parents

A mon frère Fateh

A ma sœur Manel et son mari Mohamed

A mes chères neveux Mohamed Adlene et Abdeldjalil

A mes amies.

A tous ceux qui me sont chères.

A tous ceux qui m'aiment.

A tous ceux que j'aime.

Je dédie ce travail.

# DEDICACE HOUSSAM

A mon père mon professeur de toujours, et ma très chère mère pour leurs soutien et encouragements.

A mes sœurs.

A mes proches et toute ma famille.

A mes amis et tous les gens qui m'aiment.

A tous ceux qui sont proches de mon cœur et dont je n'ai pas cité le nom.

Au bonheur des plus chers.

Je dédie ce modeste travail.

---

## ملخص:

عملنا هو جزء من مشروع بحثي يتمحور حول شبكية العين، وواحد من المحاور، يتعلق بإنشاء جهاز لتحسين عملية التدخل بالليزر على مستوى العين. وتعرض هذه الورقة دراسة، تصميم ومحاكاة لجهاز استشعار الصور موجود في جهاز لأخذ صورة من العين لتحديد موقع شعاع الليزر. لتحقيق هدفنا درسنا أولاً مبادئ الأداء والهندسة الخاصة بأجهزة استشعار الصور، هذه الدراسة تسلط الضوء على أهمية استخدام عملية CMOS القياسية لإنتاج أجهزة الاستشعار التي تلبي مواصفات التطبيق المستهدف. ثم قدمنا دراسة لتحديد موقع الجهاز بالإضافة إلى الهندسة الداخلية لأجهزة الاستشعار (حجم المصفوفة، والهندسة الـ بكسل ... الخ.)، يليه محاكاة أجريت في برنامج .MATLAB

**كلمات المفاتيح:** أجهزة استشعار الصور، جهاز استشعار الصور CMOS، بيكسل فعال، مصفوفة حساسة للضوء.

---

## Résumé :

Notre travail s'insère dans le projet de recherche s'articulant autour de la rétine dont l'un des axes ,porte sur la réalisation d'un dispositif pour l'optimisation du processus de photocoagulation au laser, ce mémoire présente une étude, conception et simulation d'un capteur d'image qui fait partie de ce dispositif pour prendre une image de l'œil afin de bien positionner le faisceau laser. Pour arriver à notre objectif nous avons en premier lieu étudié les principes de fonctionnement et architectures des capteurs d'images, cette étude a notamment fait ressortir la pertinence d'utiliser un procédé CMOS standard pour réaliser un capteur répondant aux spécifications de l'application visée. Ensuite nous avons fait une étude sur l'emplacement et l'architecture interne du capteur (taille de matrice, architecture de pixels...etc.) suivie par une simulation réalisée sous le logiciel MATLAB.

**Mots clés :** Capteurs d'images, Capteur CMOS, Pixel actif (APS), Matrice photosensible.

---

## Abstract :

Our research work is concerned with eye vision, and shows how to make a device, a sensor that optimizes the process of photocoagulation with laser. This dissertation offers study, design and simulation of a picture- sensor which can take the Picture of the eye effectively while fixing the laser beam. In order to reach this objective, we have first studied the architecture of the sensor and its working principles. Throughout this research, we were able to point out the necessity of using a standard process CMOS to fit the specifications of the required application with asuitable ssensor. After that, we proceeded with the study of the sensor's internal architecture, such as the size of the matrix, and the architecture of PIXELS and its implementation. Finally, we realized a simulation with the help of MATLAB program.

**Keywords :** Image sensors, CMOS sensor, Active pixel (APS), Photosensitive matrix.

---

## Liste des acronymes et d'abréviations :

CCD : Charge Coupled Device

CMOS : Complementary Metal-Oxyde-Semiconductor

F : distance focale

$\eta_{\text{eff}}$  : rendement effectif du pixel

$\eta$  : rendement quantique du photodiode

$F_R$  : Facteur de remplissage

$\Phi_0$  : flux lumineux incident

$\Phi_r$  : flux lumineux reflété

$\Phi_t$  : flux lumineux absorbé

E : énergie du photon

$\nu$  : fréquence du rayonnement

h : constante de Planck

c : vitesse de la lumière

$\lambda$  : longueur d'onde

Pi : Puissance lumineuse

R : la réflectance

$\alpha$  : coefficient d'absorption

$J_n$  : densité de courants des électrons

$J_p$  : densité de courants des trous

$J_d$  : densité de courant de photogénération

$J_{ph}$  : photocourant

$L_p$  : longueur de diffusion des électrons

$L_n$  : longueur de diffusion des trous

$D_n$  : coefficient de diffusion des électrons

$D_p$  : coefficient de diffusion des trous

PPS : Passive Pixel Sensor (capteur à pixel passif)

APS : Active Pixel Sensor (capteur à pixel actif)

$V_{ph}$  : tension aux bornes de la photodiode lors de l'intégration

$V_{rest}$  : tension de reset appliquée à la photodiode

CAN : Convertisseur Analogique Numérique

FPN : Fixed Pattern Noise (bruit spatiale fixe)

CDS : Double Échantillonnage Corrélé

NCDS : Double Échantillonnage Non Corrélé

DDS : Double Échantillonnage Delta

## Table des matières :

Introduction générale.....	4
Chapitre 1.....	4
1.1. Introduction.....	4
1.2. Rappels d'optique.....	5
1.2.1. Choix de la focale.....	5
1.2.2. Réglage de la netteté.....	6
1.2.3. Temps d'exposition – ou vitesse d'obturation.....	7
1.3. Indicateurs de performance.....	7
a) Paramètres géométriques.....	8
1. Résolution.....	8
2. La taille du pixel.....	8
3. Le facteur de remplissage.....	9
b) Paramètres liés au photosite.....	9
1. Le rendement quantique.....	9
2. Le courant d'obscurité.....	11
3. La capacité parasite de la photodiode.....	11
4. La dynamique.....	11
5. La sensibilité.....	12
c) Paramètres électriques.....	12
1. La vitesse de lecture.....	12
2. L'anti-éblouissement.....	12
1.4. Capteur CCD.....	13
1.4.1. Transfert de charges.....	13
1.4.2. Les différents types de capteurs CCD.....	16
A. Full frame.....	16
B. Frame transfert.....	16
C. Interligne transfert.....	17
1.4.3. Capteur CMOS.....	18
1.5. Comparaison entre les capteurs CCD et les capteurs CMOS.....	19
1.6. Conclusion.....	20
Chapitre 2.....	21
2.1 Introduction.....	21

2.2 La chaine de l'image.....	21
2.2.1 La matrice d'éléments photosensibles.....	22
2.2.2 La Photodiode.....	24
A. Évolution du flux de photons dans un semi-conducteur.....	27
B. Photo-courant de la jonction PN.....	28
2.2.3 Les pixels.....	30
A. Pixel passif PPS.....	30
B. Capteur a pixel actif APS.....	32
I. Mode tension.....	32
II. Mode courant.....	33
III. Mode logarithmique.....	34
C. Les pixels « global shutter » à quatre transistors.....	35
2.2.4 Le circuit de lecture.....	36
2.2.5 La conversion analogique numérique.....	37
a) La conversion pour toute la matrice.....	38
b) La conversion au niveau des amplificateurs colonnes.....	38
c) La conversion au sein des pixels.....	39
2.3 Le bruit.....	41
A. Le bruit temporel.....	41
B. Le bruit thermique.....	41
C. Le bruit de grenaille.....	41
D. Le bruit flicker.....	42
E. Le bruit spatial fixe.....	42
- Le bruit spatial fixe pixel.....	42
- Le bruit spatial fixe colonne.....	43
2.4 Technique de réduction du bruit.....	43
I. Double échantillonnage corrélé (CDS).....	44
II. Double échantillonnage non corrélé (NCDS).....	45
III. Double échantillonnage Delta (DDS).....	45
2.5 Conclusion.....	46

Chapitre 3.....	47
3.1 Introduction.....	47
3.2 Contexte.....	47
3.3 Architecture du capteur.....	50
3.3.1 Matrice photosensible.....	51
3.3.2 Pixels actif.....	52
3.3.2.1 Architecture du pixel.....	52
3.3.2.2 Mode de fonctionnement.....	53
3.3.3 Le convertisseur simple rampe.....	53
3.3.4 Décodeur de lignes.....	55
3.3.5 Mémoire tampon.....	56
3.4 Paramètres du capteur.....	57
3.4.1 Taille du capteur.....	57
3.4.2 Mode d`acquisition séquentiel.....	58
3.4.3 Temps d`acquisition.....	58
3.5 Fabrication des microlentilles.....	59
3.6 Simulation sous MATLAB.....	60
1. Calcul de la reflectance.....	62
2. Calcul du coefficient d`absorption.....	63
3. Calcul du photocourant.....	63
4. Convertisseur analogique numerique.....	64
3.7 Conclusion.....	65
Chapitre 4.....	67
4.1 Introduction.....	67
4.2.1 Coefficient de réflexion.....	67

4.2.2 Coefficient d'absorption .....	68
4.2.3 Courant photonique.....	69
4.3 Tension de sortie.....	70
4.4 Codage des couleurs.....	71
4.5 Conclusion.....	72

## Liste des figures :

### Chapitre 1 :

Figure 1.1 : Projection d'une scène sur le capteur correctement placé.....	5
Figure 1.2 : Distance focale d'un objectif.....	6
Figure 1.3 : Optique géométrique et réglage de la netteté.....	7
Figure 1.4 : Utilisation des microlentilles.....	9
Figure 1.5 : Rendements des 3 régions de la jonction PN.....	10
Figure 1.6 : Schéma équivalent d'un registre à décalage.....	14
Figure 1.7 : Architecture d'un capteur d'image CCD.....	15
Figure 1.8 : Full frame architecture.....	16
Figure 1.9 : Frame transfert architecture.....	17
Figure 1.10 : Interligne transfert architecture.....	17
Figure 1.11 : Deux types des capteurs CMOS : (a) à pixel passif (PPS) ; (b) à pixel active (APS).....	18

### Chapitre 2 :

Figure 2.1 : Schéma bloc d'un capteur d'image CMOS.....	22
Figure 2.2 : Schéma bloc d'un imageur CMOS : aucune ligne ni colonne n'est sélectionnée.....	23
Figure 2.3 : Schéma bloc d'un imageur CMOS : lecture d'un seul pixel.....	23
Figure 2.4 : Type de rayonnement, longueur d'onde, énergie d'un photon et sensibilité spectrale de quelques matériaux.....	24
Figure 2.5 : Caractéristique de fonctionnement de la photodiode.....	26
Figure 2.6 : Caractéristiques de fonctionnement de la photodiode dans le sens inverse.....	26
Figure 2.7 : ZCE de la photodiode.....	27

Figure 2.8 : Architecture du pixel passif PPS.....	31
Figure 2.9 : Montage d'un pixel en mode tension.....	32
Figure 2.10 : Montage d'un pixel en mode courant.....	33
Figure 2.11 : Montage d'un pixel en mode logarithmique.....	35
Figure 2.12 : Pixel à "global shutter" à quatre transistors.....	35
Figure 2.13 : Fonctionnement transitoire des pixels à "global shutter" à quatre transistors.....	36
Figure 2.14 : Schéma bloc d'un amplificateur colonne.....	37
Figure 2.15 : schéma d'un convertisseur pour toute la matrice.....	38
Figure 2.16 : Schéma d'un convertisseur par colonne.....	39
Figure 2.17 : schéma d'un convertisseur par pixel.....	40
Figure 2.18 : Schéma de pixel à sortie numérique à convertisseur simple rampe.....	40
Figure 2.19 : Bruit FPN, a) bruit spatial fixe pixel, b) bruit spatial fixe colonne, c) bruit spatial fixe total.....	43
Figure 2.20 : Technique de réduction de bruit CDS.....	44
Figure 2.21 : Technique de réduction de bruit NCDS.....	45
 <b>Chapitre 3 :</b>	
Figure 3.1 : Architecture du system globale.....	48
Figure 3.2 : Schéma synoptique du fonctionnement du système.....	49
Figure 3.3 : Architecture du capteur CMOS.....	50
Figure 3.4 : projection d'un objet sur la matrice photosensible.....	51
Figure 3.5 : Architecture du pixel 3T.....	53
Figure 3.6 : schéma fonctionnel d'un convertisseur simple rampe.....	54
Figure 3.7 : décodeur de lignes.....	55
Figure 3.8 : Transfert des données dans la mémoire tampon.....	56

Figure 3.9 : Structure de la mémoire tampon.....	57
Figure 3.10 : Déroulement du processus de fabrication de microlentilles.....	60
Figure 3.11 : schéma synoptique du déroulement du programme.....	61
Figure 3.12 : Programme de calcul de la réflectance.....	62
Figure 3.13 : Programme de calcul du coefficient d`absorption.....	63
Figure 3.14 : Programme de calcul du photocourant.....	64
Figure 3.15 : Programme du convertisseur analogique numérique.....	65

## **Chapitre4 :**

Figure 4.1 : Simulation de coefficient de réflexion.....	67
Figure 4.2 : Simulation de coefficient d`absorption .....	68
Figure 4.3 : Simulation de la tension de sortie en fonction de lambda.....	69
Figure 4.4 : Simulation de la tension de sortie en fonction de lambda.....	70
Figure 4.5 : Simulation de la tension de sortie en fonction de Iph.....	70
Figure 4.6 couleur obtenu pour lambda = 480nm.....	71
Figure 4.7 : couleur obtenu pour lambda = 800nm .....	71
Figure 4.8 : couleur obtenu pour lambda = 580nm .....	72

# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

Au cours des deux dernières décennies, les progrès technologiques réalisés au niveau matériel et logiciel ont permis un grand essor à la vente de l'électronique grand public. Ils sont basés sur la conversion de l'information analogique en sa forme numérique. Comme dans de nombreux autres domaines où les appareils numériques ont remplacé leurs prédécesseurs analogiques, les fabricants et les consommateurs ont perdu l'intérêt pour les caméras à film conventionnelles et se sont tournés plutôt vers les appareils photo numériques. Ceci est principalement dû au fait que la capture et le développement de photos en utilisant les procédés chimiques et mécaniques ne peuvent pas fournir aux utilisateurs le confort des appareils photo numériques qui enregistrent, stockent et manipulent électroniquement les photographies en utilisant des capteurs d'images et des processeurs embarqués.

Des fonctionnalités telles que l'affichage d'une image immédiatement après sa capture, la capacité de stocker des milliers d'images sur un petit périphérique de mémoire, la capacité de supprimer des images de ce périphérique afin de permettre sa réutilisation, et la possibilité d'éditer des images avec son appareil photo numérique font de ces appareils des produits électroniques de consommation très attractifs.

Pour créer une image d'une scène, les caméras numériques utilisent une série de lentilles pour concentrer la lumière sur un capteur d'images qui échantillonne la lumière et l'enregistre sous forme d'information électronique qui est ensuite convertie en données numériques. Le capteur d'images est une matrice de photodétecteurs sensibles à la lumière, appelés pixels, qui enregistrent l'intensité de la lumière qui frappe leur surface.

Il existe deux principales technologies couramment utilisées de nos jours pour réaliser les capteurs d'images : la technologie CCD (Charge Coupled Devices) et la technologie CMOS (Complementary Metal-Oxyde-Semiconductor). La première technologie à être

utilisée pour réaliser des capteurs d'images était la technologie CCD qui était utilisée longtemps exclusivement jusqu'à ce que l'utilisation de la technologie CMOS pour réaliser des capteurs d'images arrive à maturité. La technologie CCD avait longtemps offert de très bonnes performances par rapport à la technologie CMOS. Il s'agit d'une technologie mature qui a atteint des niveaux de rendement et de performances près des limites théoriques et cela fait des années qu'elle n'a pas connue d'améliorations significatives. Cependant, cette technologie a de nombreux points faibles : elle nécessite plusieurs niveaux de tensions élevés, la consommation en courant est élevée et le plus important est que le procédé CCD est un procédé spécial coûteux et qui, en plus, ne permet pas d'intégrer au capteur d'autres circuits électroniques. Les capteurs d'images CMOS réalisés à l'aide du procédé CMOS semblable au procédé avec lequel sont réalisés les circuits intégrés numériques et les microprocesseurs présente la solution aux points faibles de la technologie CCD. En effet, les capteurs CMOS ont un coût de fabrication bas et une faible consommation en puissance. De plus, il est possible d'intégrer facilement d'autres circuits à même la puce du capteur.

Cette dernière décennie, la fabrication des capteurs d'images à l'aide de la technologie CMOS a connue des avancées technologiques majeures. Ceci a causé une réorientation de la recherche qui a abandonné progressivement les capteurs CCD au profit des capteurs CMOS.

Les capteurs d'images sont omniprésents dans plusieurs types d'applications : on les trouve, en plus des caméras numériques, dans les caméscopes, les scanners, les fax, les photocopieurs, les lecteurs de codes à barres, les systèmes de surveillance, les instruments d'observation spatiaux, dans les systèmes de vision industriels où ils sont utilisés pour le tri et le contrôle de la production ainsi que dans les équipements d'imagerie médicale.

Notre projet basé sur l'étude d'un capteur s'insère dans un projet de réalisation d'un système qui optimise le traitement par photocoagulation au laser.

Pour voir, il faut d'abord que l'œil forme une image précise de la réalité sur la rétine. Cette partie de l'œil peut être atteinte d'une affection responsable d'un trouble visuel. Un traitement par photo coagulation au laser s'avère nécessaire dans certains cas de troubles visuels. La photocoagulation est utilisée dans le traitement des déchirures rétiniennes et des autres lésions susceptibles de provoquer un décollement de rétine. Le laser provoque une petite brûlure à l'origine d'une inflammation locale, mais la technique actuelle qui

consiste à contrôler le laser manuellement peut avoir autant d'effets bénéfiques que d'effets indésirables et Cela est dû à la rétine qui est si sensible qu'elle peut même être influencée par les battements du cœur.

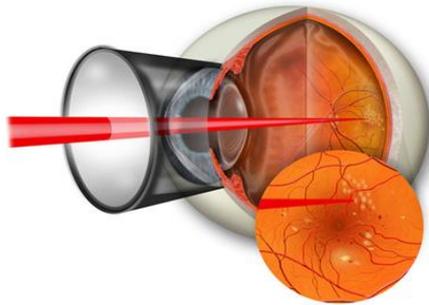


Figure 1 : Photocoagulation au laser

Ce mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre, présente l'historique des capteurs d'images ainsi que la description des capteurs CCD (charge coupled device) et capteurs CMOS (complementary metal oxide semiconductor) et se termine par une comparaison entre les 2 capteurs.

Le deuxième chapitre, analyse en détails les capteurs d'images CMOS en décrivant leur architecture ainsi que leur mode de fonctionnement et leurs équations.

Le troisième chapitre, présente l'étude de notre capteur CMOS dédié au processus de photocoagulation (architecture interne, positionnement...) ainsi que la simulation d'une matrice de  $M \times N$  pixels avec le logiciel MALAB.

Le quatrième chapitre, présente les résultats de simulation d'une matrice de  $M \times N$  pixels.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur les capteurs**

# Chapitre 1 Généralités sur les capteurs d'images

---

## 1.1 Introduction :

Un capteur d'images est un composant électronique photosensible qui permet d'acquérir des images en captant la lumière (photons), grâce à sa partie photosensible (photodiode). Leur surface sensible constituée d'une myriade de photo-capteurs se situe dans le plan image de l'appareil de prise de vue et reçoit l'image réelle de la scène focalisée par le bloc optique.

Cette image réelle inversée est décomposée en points élémentaires (les pixels) agencés selon une matrice à deux dimensions.

L'analyse successive des éléments de la matrice, rangés en lignes et en colonnes fournit pour chaque pixel de l'image, un photocourant qui se transforme en tension continue directement proportionnelle à l'éclairement reçu et constitue pour le capteur une information élémentaire de luminosité.

L'exploitation ultérieure de cette information nécessite la conversion des valeurs analogiques en grandeurs numériques pour être ensuite utilisées dans les circuits de traitement de l'information.

En photographie numérique, deux types de capteurs matriciels sont utilisés pour l'analyse de l'image, les capteurs CCD « Charge Coupled Devices », dispositifs à transfert de charges et les capteurs CMOS « Complementary Metal Oxyde Semi-conductor ». Les deux types de capteurs utilisent toujours les mêmes composants de base, les transistors MOS, mais c'est la façon d'obtenir les signaux électriques représentant les informations élémentaires des pixels qui diffère.

De plus, les capteurs CCD nécessitent des chaînes de fabrication spéciales alors que les capteurs CMOS sont produits sur des chaînes conventionnelles de grande production utilisées dans l'industrie des circuits intégrés.

## 1.2 Rappels d'optique :

Un système optique est un ensemble d'éléments optiques, tels que des miroirs, des lentilles, des réseaux de diffraction, etc. permettant de modifier la trajectoire des rayons lumineux ou les propriétés de la lumière. Le principe optique est le même pour tous les types de capteurs (y compris non électroniques) [1] : un capteur est placé derrière un objectif, à une distance adéquate pour que l'image s'y projette nettement. (Fig. 1.1).

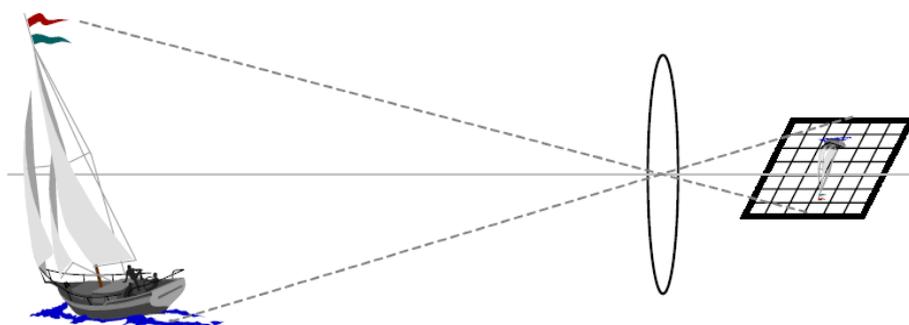


Figure 1.1 : Projection d'une scène sur le capteur correctement placé

Comme dans tout système optique, nous devons régler les paramètres de l'objectif pour projeter convenablement l'image sur la puce. Nous allons passer en revue ces différents paramètres.

### 1.2.1 Choix de la focale :

La longueur (ou distance) focale ( $f$ ) est définie par la distance entre le foyer  $F$  (point où convergent les rayons lumineux) et le centre optique  $O$  (centre de l'objectif). Le foyer est le point de convergence de rayons lumineux arrivant sur l'objectif parallèlement à l'axe optique. Le choix de la focale est fait en fonction du champ de vision désiré et de la taille du capteur.

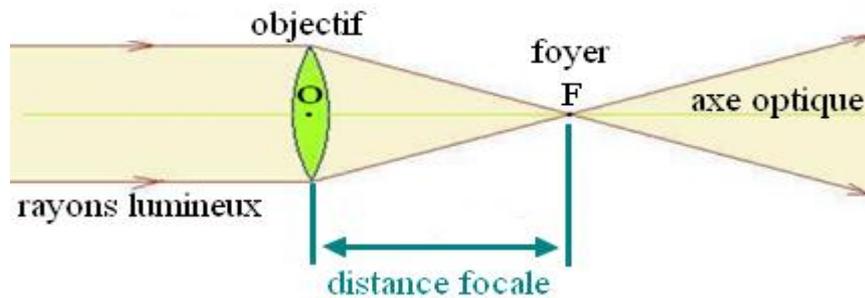


Figure 1.2 : Distance Focale d'un objectif

### 1.2.2 Réglage de la netteté :

Le réglage de la netteté (ou mise au point) permet d'ajuster le centre optique O de l'objectif par rapport à la distance de l'objet observé. Lorsque ce paramètre est correctement réglé, l'image est nette. La (Fig. 1.3) illustre la relation d'optique géométrique :

$$\frac{1}{OF} = \frac{1}{OA} + \frac{1}{OB} \quad (1.1)$$

Cette relation montre le lien entre la distance OB de l'objet à l'objectif et la distance OA de la lentille au capteur. Pour une taille de capteur donnée, nous voyons qu'un mouvement de la lentille permet de projeter convenablement l'objet.

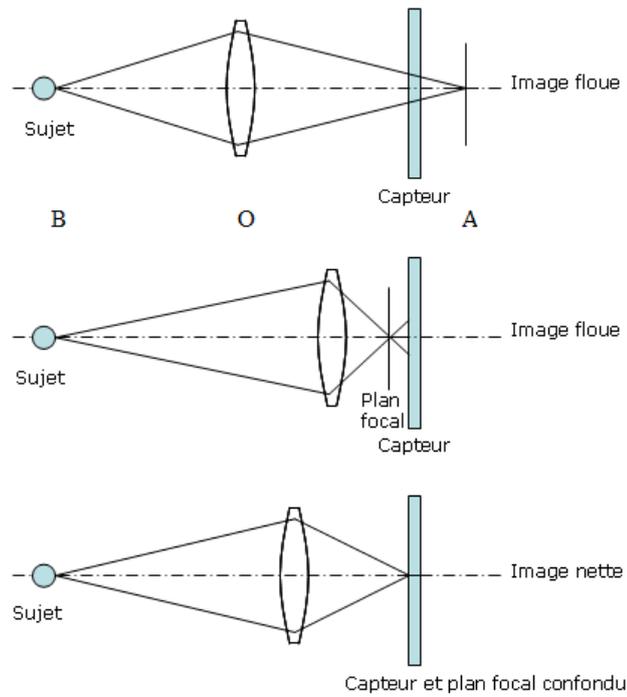


Figure 1.3 : Optique géométrique et réglage de la netteté

### 1.2.3 Temps d'exposition – ou vitesse d'obturation :

Le temps d'exposition représente le temps nécessaire pour que la cible sensible à la lumière acquière la scène observée. Ce temps est bien sûr lié à la quantité de lumière reçue.

En effet, le produit de l'intensité de la lumière moyenne avec le temps d'exposition doit être globalement constant et calibré par rapport à l'élément photosensible. La vitesse s'exprime en fractions de secondes exemple à  $1/125$  de seconde, c'est une seconde divisée en 125 morceaux et on en prend un qui représente le temps de pose.

Si nous avons une vitesse d'obturation trop longue, l'image sera surexposée (trop claire) et à l'inverse, si la vitesse d'obturation est trop courte nous aurons une image sous-exposée (trop sombre) [2]. La vitesse permet de jouer avec les sujets en mouvement, soit les figer grâce à une vitesse rapide ou à l'inverse jouer avec les flous de mouvements quand un sujet rapide est pris en photo avec une vitesse lente, ils « filent » sur l'image.

### 1.3 Indicateurs de performance :

La fidélité de l'image captée par rapport à la scène originale est un prérequis important dans la majorité des applications. Par conséquent, il existe plusieurs indicateurs de

performance qui qualifient et quantifient les performances d'un capteur d'images. Les sous-sections suivantes visent à introduire les principaux indicateurs de performance qui sont reliés, de près ou de loin, aux circuits électroniques qui composent le capteur d'images.

## **a) Paramètres géométriques :**

### **1. Résolution :**

La résolution d'un capteur d'images est définie comme étant le nombre de pixels qui composent la matrice. Plus la résolution est élevée, plus le confort visuel est grand (les détails sont bien définis), mais plus le capteur est coûteux [1]. La technique la plus populaire pour augmenter la résolution consiste à réduire la surface occupée par un pixel en optimisant les dessins de masque. Pour ce faire, on peut diminuer le nombre de transistors compris dans un pixel actif, ou encore réduire la taille des transistors utilisés. Bien que certains appareils, comme les caméras ou les appareils photographiques numériques, offrent des résolutions toujours plus élevées, il faut préciser qu'il existe bon nombre d'applications ne nécessitant pas une très forte résolution. C'est le cas par exemple des caméras de surveillance ou des webcams, dont la priorité est un compromis entre la qualité d'image et le prix. De plus, une image à grande résolution entraîne une masse de données d'autant plus importante à traiter.

### **2. La taille du pixel :**

Elle dépend de la taille de la partie photosensible (photodiode), du nombre et de la taille des transistors ainsi que de la technologie utilisée pour la conception du pixel. Par ailleurs, le choix de la taille de pixel est relié aux objectifs du capteur. Grâce à l'avancement de la technologie, la taille du pixel diminue de plus en plus afin d'insérer toujours plus de pixels dans une matrice est ainsi obtenir une grande résolution, un circuit de petite taille et un coût de fabrication réduit.

### 3. Le facteur de remplissage :

C'est le rapport entre la surface dédiée à la photodiode et la surface totale du pixel. Plus la surface de la photodiode est grande par rapport à la surface des transistors, plus le facteur de remplissage est important : le transfert de photons en tension analogique est de ce fait meilleur. Le facteur de remplissage est connu sous le nom de "fill factor" et est compris entre 20 et 80% [3]. On peut avoir recours à une matrice de microlentilles pour améliorer le facteur de remplissage du circuit. Celles-ci sont de même taille qu'un pixel, et sont utilisées pour concentrer le faisceau lumineux vers la partie sensible du capteur. On peut atteindre ainsi des facteurs de remplissage équivalents proches de 100% [4].

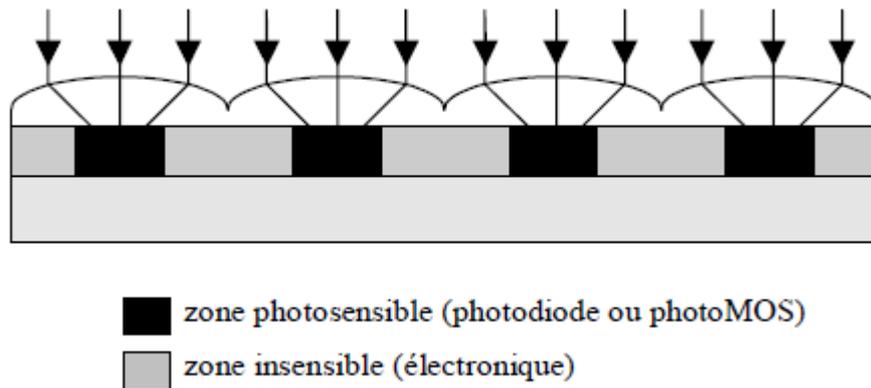


Figure 1.4 : Utilisation des microlentilles

### b) Paramètres liés au photosite :

#### 1. Le rendement quantique :

C'est le pourcentage de photons que la photodiode transforme en énergie électrique par la création de paires d'électron-trou. Dans le cas idéal chaque photon reçu par la photodiode sera généré en électron-trou à condition que son énergie soit supérieure au gap du silicium qui est de 1.12eV, soit une longueur d'onde d'une onde incidente de moins de l'énergie de gap. Mais cela est trop parfait pour être vrai, car dans la réalité ce pourcentage de conversion est limité par plusieurs paramètres :

– Le coefficient de réflexion de la surface de silicium.

- La largeur de la zone de charge d'espace (ZCE).
- Les recombinaisons en surface et en profondeur des charges, d'ailleurs, une jonction plus profonde permet en effet d'améliorer le rendement quantique pour les grandes longueurs d'onde ( $\lambda > 600$  nm) – de faible énergie [3].

Étant donné que la surface du pixel n'est pas totalement dédiée à la photodiode, le rendement quantique de cette dernière n'est pas exactement celui du pixel. Ce paramètre est loin d'être négligeable comme l'équation (1.2) le montre :

$$\eta_{\text{eff}} = \eta \times F_R \quad (1.2)$$

Avec : «  $\eta_{\text{eff}}$  » le rendement effectif du pixel ; «  $\eta$  » le rendement quantique de la photodiode ; «  $F_R$  » le facteur de remplissage du pixel, c'est à dire la surface dédiée à la photodiode dans le pixel.

Cette surface est dépendante du nombre et de la taille des transistors du pixel. En général elle est estimée entre 20 et 80%.

Le rendement quantique est aussi dépendant de la longueur d'onde (Fig. 1.5). On ne peut pas définir, en premier, le rendement quantique sans avoir défini la longueur d'onde.

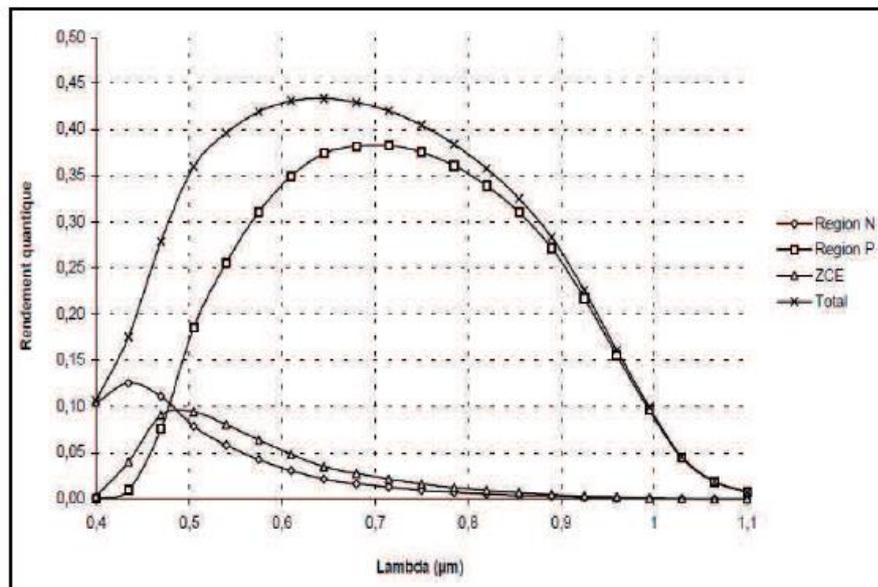


Figure 1.5 : Rendements des 3 régions de la jonction PN [3]

Lorsque la photodiode est éclairée par la lumière, une partie du flux lumineux est reflétée ( $\Phi_r(E)$ ) et une autre partie du flux est absorbée par le silicium ( $\Phi_t(E)$ ).

## **2. Le courant d'obscurité :**

Le courant d'obscurité représente le courant mesuré par le pixel en l'absence de toute illumination. Il est principalement dû au courant de saturation inverse de la photodiode, les courants de fuite des transistors étant négligeables. Les conséquences d'un courant d'obscurité élevé sont, entre autres, l'impossibilité d'obtenir un niveau de noir satisfaisant et une réduction de la plage d'illumination que le capteur est en mesure de détecter. En outre, la variation des courants d'obscurité des pixels entraîne une réduction de l'uniformité de l'image en situation de faible illumination. Cette non-uniformité ne peut pas être rectifiée par un mécanisme externe de correction. Il est donc important de minimiser le courant de noirceur lors de la conception du pixel. Dans le cas du silicium, le courant d'obscurité double tous les 7° [5]. Cette grandeur a des composantes géométriques (périmétrique et surfacique), on peut donc la minimiser dans le procédé standard de fabrication en agissant sur la géométrie de la photodiode.

## **3. La capacité parasite de la photodiode :**

Bien qu'elle ne soit pas une spécification propre du capteur, la capacité parasite de la photodiode est très importante pour la valeur du facteur de conversion (dans le cas d'un pixel intégrant) et pour le bruit lié à la remise à zéro du pixel. On cherchera dans tous les cas à obtenir une capacité parasite de photodiode la plus faible possible, ce qui sera facilité par la réduction de la taille des pixels, au fur et à mesure de leur évolution.

## **4. La dynamique :**

La dynamique est la plage de luminosité dans laquelle le capteur est capable de mesurer correctement l'information. Elle est en fait comprise entre les deux niveaux extrêmes (du signal) que peut traiter le capteur. Le premier est le niveau de saturation du capteur, le second est le niveau du bruit. Les capteurs d'images ont donc des problèmes de sensibilité en lumière faible (faible flux), et des problèmes de saturation en lumière forte.

## **5. La sensibilité :**

La sensibilité du capteur d'images est dépendante directement de la photodiode. La sensibilité est le nombre de photons nécessaires pour passer d'un niveau de gris au suivant.

Elle dépend de trois facteurs :

- La surface réellement active de chaque photoélément : plus le photosite a une taille importante, plus il collecte de photons par unité de temps et donc meilleure est la sensibilité ;
- L'efficacité quantique du photodétecteur lors de la conversion des photons en paires électron – trou : elle est définie par le rapport électrons produits par photons incidents.
- Le coefficient de réflexion du matériau : la lumière perdue par réflexion sur le capteur limite le nombre de photons incidents.

Les techniques d'amélioration de la sensibilité des photodétecteurs sont essentiellement technologiques (pinned photodiodes, ou photo détecteurs intégrés verticalement) [3].

### **c) Paramètres électriques :**

#### **1. La vitesse de lecture :**

La vitesse de lecture est la vitesse de balayage de toute la matrice de pixel. Elle s'exprime en nombre d'images par seconde (frame per second ou fps) généralement il est entre 25 et 60 images par seconde pour des applications standard. En revanche la vitesse de lecture peut atteindre 10000 images par seconde pour des applications spécifiques telles que la vidéo à très grande vitesse [3].

#### **2. L'anti-éblouissement :**

Cette propriété est fondamentale pour les systèmes d'imagerie, car elle consiste à empêcher un pixel qui subit une trop forte illumination de parasiter ses pixels voisins. En effet, les charges créées par la lumière sont parfois accumulées dans le substrat et peuvent

se propager dans le capteur si elles sont trop nombreuses, modifiant ainsi le rendement quantique des pixels voisins.

Pour éviter cela, on peut soit utiliser une structure de photosite qui empêche les charges de se propager (par exemple en isolant les pixels entre eux par des caissons successifs), ou bien prévoir un transistor d'évacuation des charges qui devient passant lorsque le potentiel en surface du photosite dépasse un certain seuil. Ce transistor peut être de structure latérale ou verticale.

## **1.4 Capteur CCD :**

Les capteurs CCD ont connu un grand succès dans de nombreux secteurs scientifiques et techniques depuis leur apparition dans les années 70 grâce aux travaux des ingénieurs W.Boyle, G.Smith et G.G.Amliodans les laboratoires Bell. Initialement utilisés pour réaliser des lignes de retard, des filtres analogiques, etc., ce concept a rapidement évolué vers des applications d'imageries. Leur principe est de transformer des photons en charges électriques, cette étape se fait au niveau de l'élément photosensible qu'est le photoMOS ou la photodiode, c'est l'élément le plus important dans le pixel.

### **1.4.1 Transfert de charges :**

La lumière incidente crée dans chaque zone photosensible une quantité de charge proportionnelle à la quantité de lumière reçue. Dans un capteur de type CCD, chaque pixel est composé d'une zone photosensible (photoMOS ou photodiode) connectée à des capacités MOS. Une fois la phase d'acquisition terminée (après un temps d'accumulation des photocharges), il faut véhiculer ces informations vers l'extérieur du capteur. Pour cela, les charges vont être transférées de capacité en capacité et ainsi de pixel en pixel jusqu'à la sortie, en utilisant un registre à transfert de charges analogiques CCD. Chaque pixel est donc composé d'une partie photosensible et d'un registre à transfert de charges analogiques.

Dans un registre à transfert de charge, les transistors sont montés en série, avec une électrode commune.

La charge du condensateur C1 va se déplacer vers la droite à travers les transistors de la façon suivante :

- 1) On ferme l'interrupteur K1 (une tension est appliquée sur la grille du transistor), les charges présentes dans le condensateur C1 se déplacent à travers le transistor T1 pour aboutir dans le condensateur C2. Ce transfert s'effectue à sens unique et quasiment toute la charge est transférée.
- 2) On ouvre l'interrupteur K1 et on ferme K2, les charges passent de C2 à C3.
- 3) On ouvre K3 et on ferme K4, les charges passent de C3 à C4.
- 4) Le processus se répète autant de fois qu'il y a de cellules.

Dans la pratique, les transistors peuvent être branchés par deux, trois ou quatre alternativement, nous prenons exemple des transistors couples alternativement (pairs/impair), les transistors sont couplés alternativement (pairs/impairs) ce qui simplifie la commande et permet le déplacement des charges avec seulement deux signaux de commande. Le fait de n'avoir que deux signaux a caractérisé ce genre de registres par l'appellation de « registre à commande Biphase ». Le rendement du système est tel que 99,9 % de la charge est transmise au bout d'une centaine de cellules [6].

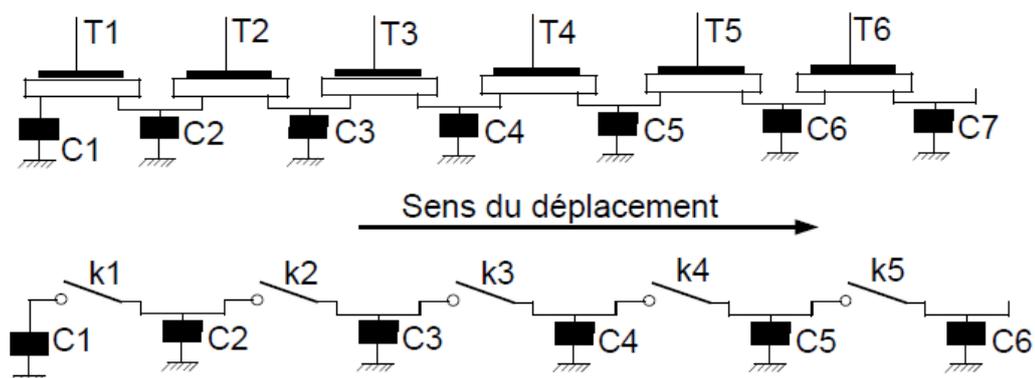


Figure 1.6 : Schéma équivalent d'un registre à décalage

La (Fig. 1.7) illustre le fonctionnement (exemple le plus basique) nécessaire pour évacuer les informations hors du capteur. Les charges sont décalées de manière série à travers les

capacités des lignes et des colonnes de la matrice. Pour une matrice de M par N pixels, il en résulte un nombre total de  $N(M+1)$  décalages.

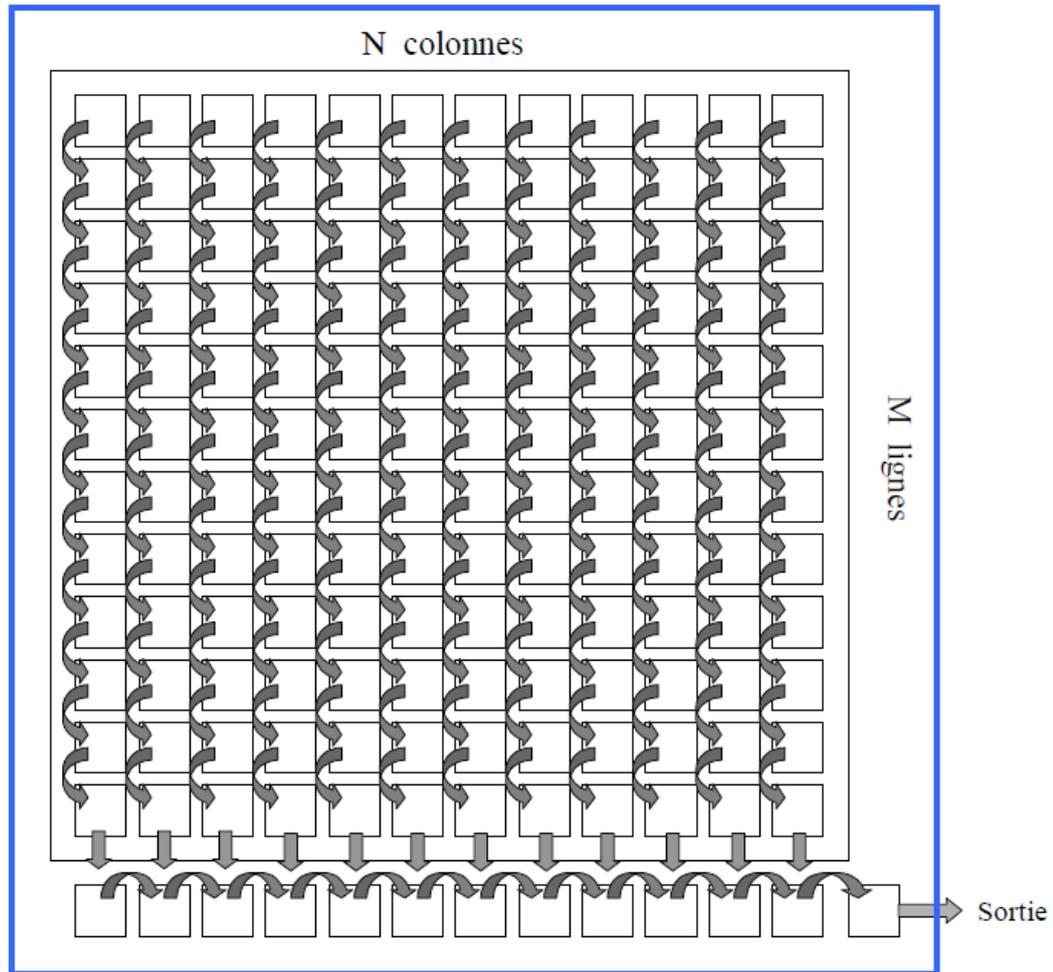


Figure 1.7 : Architecture d'un capteur d'image CCD

Pour obtenir un tel fonctionnement, le circuit est piloté par un circuit de commande générant plusieurs horloges avec différentes tensions. En effet, les transferts (charges et décharges) sont réalisés en appliquant des tensions élevées et convenablement agencées sur les capacités.

En sortie de la matrice, les charges sont transférées sur une capacité de faible valeur. La tension ainsi obtenue est ensuite amplifiée à l'extérieur du capteur pour attaquer un convertisseur analogique numérique (généralement de résolution 8 à 15 bits).

### 1.4.2 Les différents types de capteurs CCD :

Il existe 3 types de capteurs qui sont définis par leur façon de lire les charges accumulées dans les puits de potentiel : les capteurs full frame, frame transfert et interligne transfert.

#### A. Full frame :

La totalité de la surface du capteur est sensible à la lumière. Après exposition, un shutter masque le photodétecteur. Les charges sont lues ligne par ligne dans le registre série.

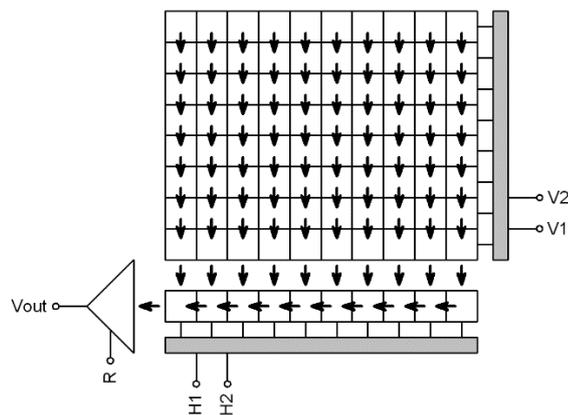


Figure 1.8 : Full frame [7]

#### B. Frame transfert:

Le capteur est divisé en 2 parties : une matrice d'exposition et une matrice de stockage. Ce type de CCD n'utilise pas de shutter. Les charges accumulées dans la totalité de la surface sensible sont transférées en une seule fois vers la matrice de stockage. Le temps de transfert entre les 2 matrices est de l'ordre de quelques microsecondes. Les charges d'une image peuvent être lues pendant que l'image suivante est acquise, ce qui permet de diminuer la durée entre 2 acquisitions.

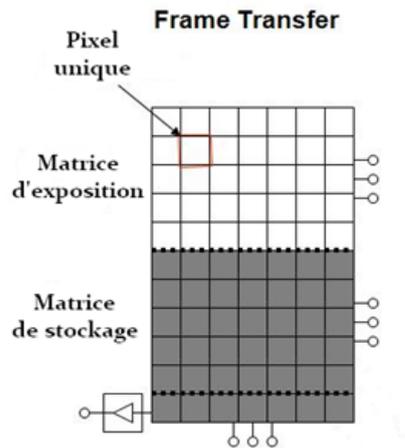


Figure 1.9 : Frame transfert [7]

### C. Interligne transfert:

Il s'agit d'une variante du frame transfert. Le capteur est subdivisé en surfaces sensibles à la lumière et en aires de stockage disposées alternativement en ligne. Les pixels accumulés dans les surfaces d'exposition sont ensuite transférés vers les aires de stockage puis lus ligne par ligne. La surface d'exposition de ces CCD est diminuée par rapport au frame transfert. La surface sensible ne représente que 25% de la surface totale du capteur. Ces caméras sont donc moins sensibles. Les caméras les plus performantes possèdent une couche de microlentilles sur toute la surface du capteur permettent de concentrer la lumière sur la surface sensible (sensibilité augmentée d'un facteur 2) [7].

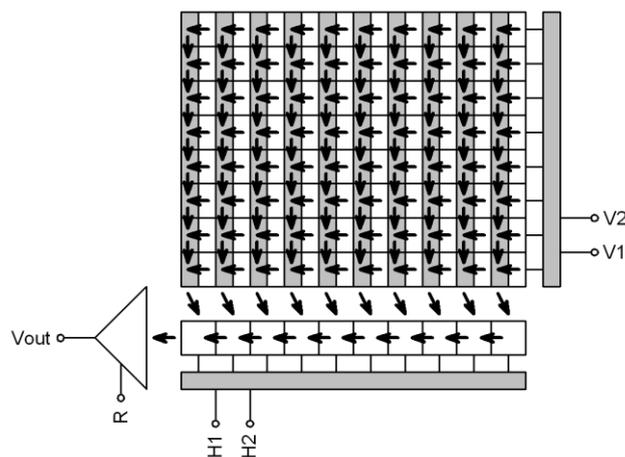


Figure 1.10 : Interligne transfert [7]

### 1.4.3 Capteur CMOS :

Tous les capteurs d'images à l'état solide utilisent le même mécanisme de phototransduction. L'interaction entre les photons et les électrons génère des charges mobiles. Ces charges véhiculés par un champ électrique forment une image électronique.

L'aspect physique du capteur CMOS ne diffère pas du capteur CCD. Les capteurs CMOS utilisent une technologie CMOS standard moins coûteuse que les CCD et qui associe à l'élément photosensible des composants actifs pour l'amplification et l'adressage. Les cellules peuvent être adressées individuellement, ou par blocs à travers un bus-colonne similaire à celui d'une mémoire. Ils ont de plus l'avantage d'une faible consommation. La technologie utilisée permet également d'intégrer des traitements au niveau du capteur (réduction de bruit par exemple).

La principale différence réside dans le fait que la conversion analogique numérique a lieu directement sur le capteur, ce qui présente des avantages mais aussi des inconvénients.

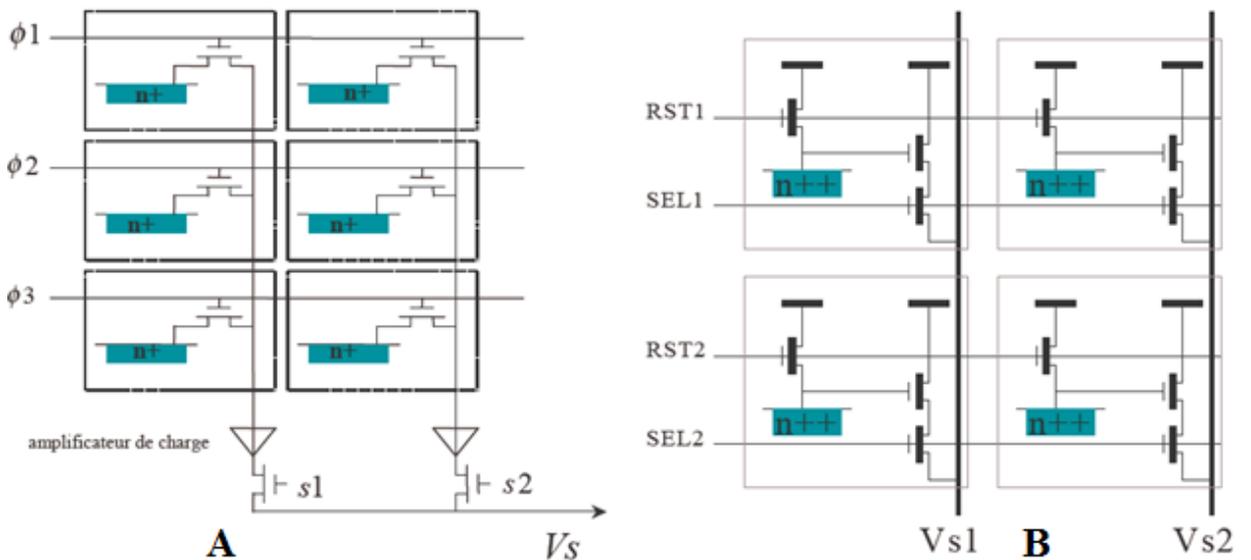


Figure 1.11: Deux types des capteurs CMOS : (a) à pixel passif (PPS) ; (b) à pixel active (APS)

## 1.5 Comparaison entre les capteurs CCD et les capteurs CMOS

Dans cette partie on fera un résumé des principales différences entre les deux types de capteurs CCD et CMOS [3] [8] :

- **Coût** : c'est le principal avantage des capteurs CMOS par rapport aux capteurs CCD, car les capteurs CCD ne peuvent pas être produits en technologie CMOS standard et sont donc fabriqués dans des centres de production dédiés.
- **Lecture des capteurs** : le transfert de charge dans un capteur CCD se fait de pixel à pixel comme montré auparavant dans la figure (1.3) ce qui fige le mode de lecture. Contrairement aux capteurs CMOS où l'adressage est fait par l'activation d'une ligne et d'une colonne, augmentant ainsi la vitesse de lecture des capteurs CMOS et l'accès potentiellement libre aux pixels.
- **Facteur de remplissage** : le facteur de remplissage est le pourcentage de l'aire du pixel sensible à la lumière par rapport à la surface du pixel. Les capteurs CCD ont un facteur de remplissage proche de 100%. En revanche, dans les capteurs CMOS il reste autour de 50 à 70%, mais avec la diminution de la taille des transistors et l'utilisation de microlentilles, le facteur de remplissage dans les capteurs CMOS s'est beaucoup amélioré.
- **Bruit** : c'est le principal désavantage des capteurs CMOS par rapport aux capteurs CCD, car les capteurs CMOS présentent du bruit temporel et du bruit spatial fixe causés par les amplificateurs dans la matrice de pixels et dans les circuits de lecture. Cependant, des techniques pour la diminution de bruit sont utilisées.
- **Consommation** : les capteurs CMOS sont polarisés à la tension d'alimentation de la technologie CMOS utilisée, ils consomment moins que les capteurs CCD qui ont besoin de valeurs de tension de l'ordre de la dizaine de volts pour réaliser le transfert de charges des pixels jusqu'au convertisseur analogique numérique.
- **Dynamique de fonctionnement** : la dynamique de fonctionnement dans les capteurs CMOS est de 60-70dB pour les capteurs standard et elle est de 120dB pour les capteurs logarithmiques. Par contre, pour les capteurs CCD la dynamique de fonctionnement est de l'ordre de 80-90dB.

## **1.6 Conclusion :**

Ce chapitre a fait un bref survol du large domaine de l'acquisition d'images numériques au moyen de semi-conducteurs. Pour ce faire, les notions de base sur les mécanismes de captation lumineuse a été passé en revue.

La pertinence de l'utilisation d'un procédé CMOS, par opposition aux populaires capteurs CCD, a aussi été mise en évidence. Cette technologie permet notamment de réduire la consommation d'un système et d'intégrer des fonctions de traitement d'images à même la puce d'acquisition.

Les principales approches présentes dans la littérature ont été recensées, avec leurs avantages et inconvénients.

Le prochain chapitre présente une étude détaillée des différents blocs des capteurs CMOS ainsi que les techniques de réduction de bruit.

**Chapitre II**  
**État de l'art sur les capteurs**  
**CMOS**

## Chapitre 2 État de l'art sur les capteurs CMOS

---

### 2.1 Introduction :

Jusqu'à la fin des années 1990, les capteurs de type CCD ont dominé le marché de façon outrageuse en raison de leur qualité d'image exceptionnelle. Forts des innovations technologiques et des efforts de recherche soutenus des dernières années, les capteurs d'images CMOS ont gagné en termes de qualité d'image et la préférence pour les capteurs CCD s'est estompée pour laisser une plus grande place aux capteurs CMOS. A ce propos, mentionnons que certains capteurs CMOS haut de gamme actuels sont en mesure de procurer une qualité d'image rivalisant avec les capteurs CCD pour les applications telles les caméras numériques.

### 2.2 La chaîne de l'image :

Les dispositifs d'acquisition d'images permettent de capturer une information lumineuse et de la convertir en un signal électrique, analogique ou numérique. Au sein du capteur d'images CMOS, les photons sont ainsi successivement convertis en charges photo générées, puis en photo courant, puis lus sous forme de tension analogique. Cette tension analogique est ensuite amplifiée, aiguillée vers la sortie du capteur et finalement convertie en signal numérique.

La (Fig. 2.1) illustre les différents blocs des capteurs d'image CMOS et leur rôle dans cette chaîne de conversion :

- la matrice d'éléments photosensibles qui fournit des tensions analogiques correspondant à l'information lumineuse respective de chaque pixel.
- l'électronique de lecture qui permet d'amplifier ces tensions et de les acheminer vers la sortie du capteur.

- un convertisseur analogique - numérique qui transforme ces tensions analogiques en signaux numériques.

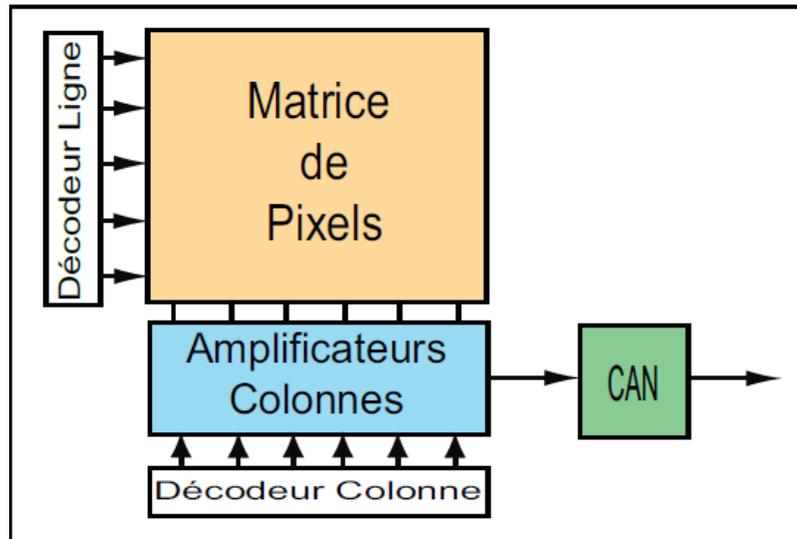


Figure 2.1 : Schéma bloc d'un capteur d'image CMOS

Nous allons maintenant présenter plus précisément chacun de ces blocs : la matrice d'éléments photosensibles, les amplificateurs colonne et la partie conversion analogique numérique.

### 2.2.1 La matrice d'éléments photosensibles :

C'est une matrice de lignes et de colonnes de pixels. Ces derniers se composent d'une photodiode et de plusieurs transistors, classiquement de trois à cinq transistors.

#### Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'un imageur CMOS (Fig. 2.2) est basé sur la sélection des pixels de la matrice photosensible un par un.

D'abord, en fonction du décodeur ligne, on sélectionne une ligne de la matrice photosensible (exemple la ligne "i") (Fig. 2.3).

Le décodeur ligne sélectionne une ligne. Les sorties pixels de cette ligne sont connectées aux amplificateurs colonnes qui stockent les valeurs des pixels.

Le décodeur colonne sélectionne une à une les valeurs stockées dans les amplificateurs colonnes pour les envoyer au convertisseur analogique numérique.

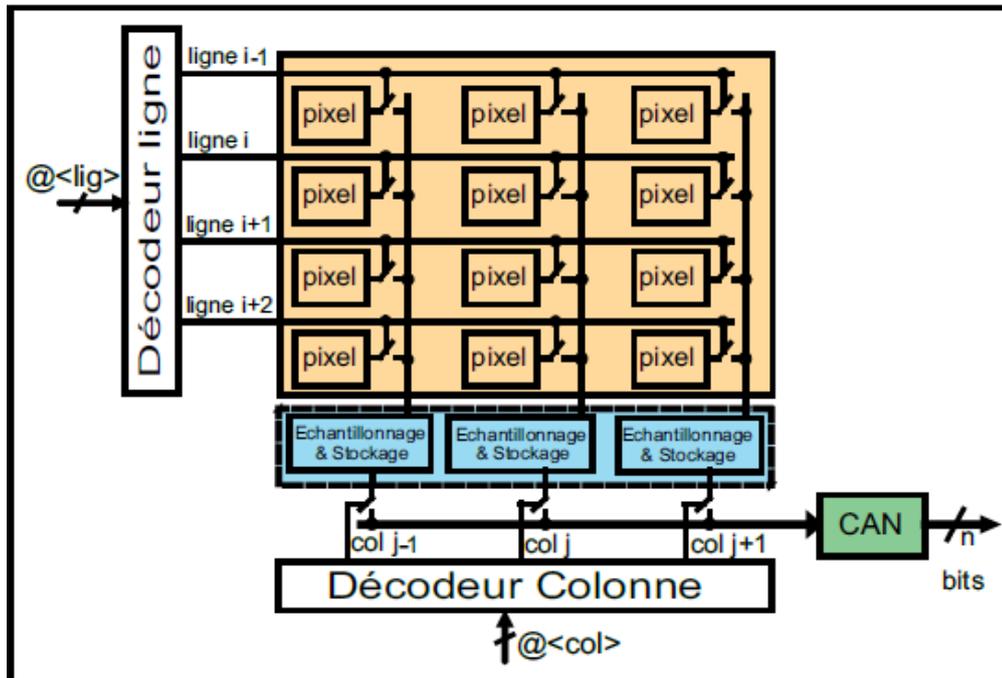


Figure 2.2 : Schéma bloc d'un imageur CMOS : aucune ligne ni colonne n'est sélectionnée

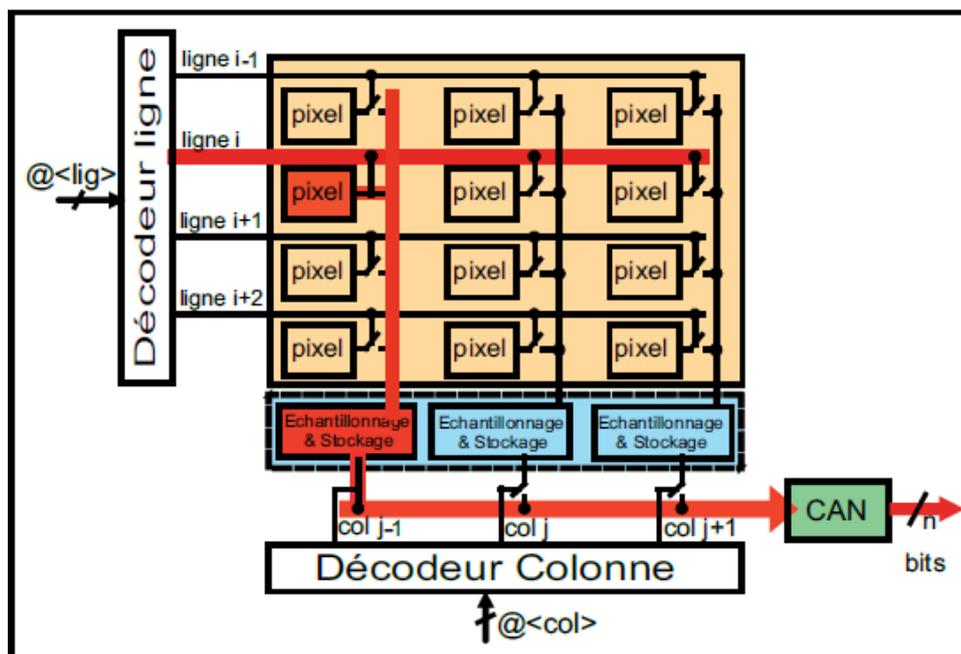


Figure 2.3 : Schéma bloc d'un imageur CMOS : lecture d'un seul pixel

Une fois la lecture de tous les pixels de la ligne "i" terminée, on passe à la ligne suivante "i+1" et on répète les mêmes procédures jusqu'à ce qu'on ait lu tous les pixels de toute la matrice.

### 2.2.2 La photodiode :

Elle transforme la lumière (les photons) en une énergie électrique par effet photoélectrique. Les longueurs d'onde à détecter et le rendement quantique nous imposera le choix du matériau qui sera utilisé pour la conception du photodétecteur. C'est pour ces raisons que dans notre cas, pour une longueur d'onde qui est dans le domaine visible (de 0.4 à 0.8  $\mu m$ ) le silicium est choisi pour sa bonne sensibilité et son bon rendement quantique (Fig. 2.4) [3]. En outre, le grand avantage du silicium est qu'il est le matériau de base des circuits intégrés CMOS.

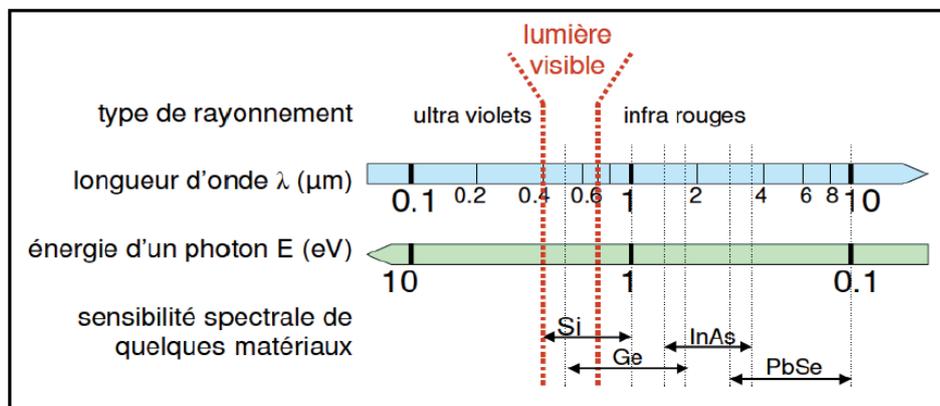


Figure 2.4 : Type de rayonnement, longueur d'onde, énergie d'un photon et sensibilité spectrale de quelques matériaux [3]

L'effet photoélectrique se définit par la création de paires électrons trous dans les matériaux semi-conducteurs dont la largeur de la bande interdite correspond à la gamme d'énergie du photon. Ceci correspond à l'énergie qu'il faut à l'électron pour qu'il quitte sa barrière de potentiel qui le maintient dans le solide. L'existence de la bande interdite entraîne l'existence d'un seuil d'absorption tel que :

$$E=hf \tag{2.1}$$

Avec : "E" l'énergie du photon en [Joules], "h" la constante de Planck en [J.s], et "v" la fréquence du rayonnement électromagnétique [Hz].

La fréquence temporelle pour un phénomène se propageant dans l'espace peut être également calculée par la relation (2.2) :

$$v = \frac{c}{\lambda} \tag{2.2}$$

Avec : "c" la vitesse de la lumière en [m.s<sup>-1</sup>] et "λ" la longueur d'onde en [m].

Des deux équations (2.1) et (2.2), l'énergie des photons "E" est définie par l'équation de Planck (2.3) suivante :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \tag{2.3}$$

Avec : "E" l'énergie du photon [Joules] ; "h" la constante de Planck (6, 623×10<sup>-34</sup>[J.s]) ; "c" la vitesse de la lumière (2.998 × 10<sup>8</sup>[m.s<sup>-1</sup>]) ; " λ " la longueur d'onde [m].

La (Fig. 2.5) présente la caractéristique du courant de la photodiode en fonction de la tension à ses bornes. On constate que cette caractéristique est divisée en deux parties : la partie directe et la partie inverse.

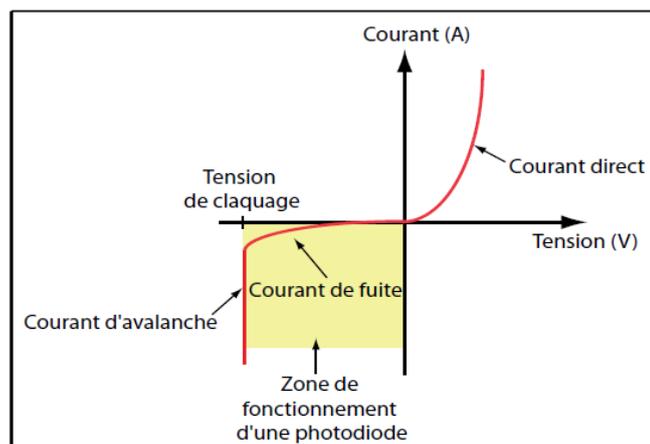


Figure 2.5 : Caractéristique de fonctionnement de la photodiode

La (Fig. 2.6) montre plus précisément la caractéristique de la photodiode dans le sens inverse. Pour une valeur donnée (fixe) de  $V_d$  (tension aux bornes de la photodiode), la photodiode fournit un courant variant en fonction de la puissance lumineuse ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ ).

Le courant inverse (courant circulant dans le sens inverse de la photodiode) augmente en valeur absolue et devient plus important avec l'augmentation de la puissance lumineuse ( $P_1 < P_2 < P_3 < P_4$ ).

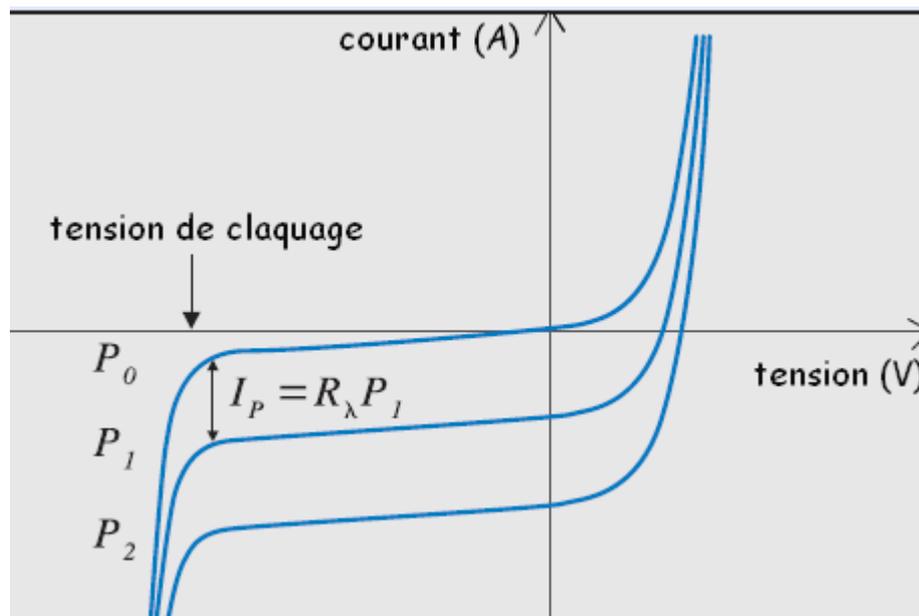


Figure 2.6 : Caractéristiques de fonctionnement de la photodiode dans le sens inverse

On trouve trois types essentiels de photo-éléments qui nous permettent de générer des charges mobiles dont la valeur est fonction du flux lumineux. Les photodétecteurs, les photodiodes et les phototransistors. Parmi ces photo-éléments, notre choix doit se porter sur la photodiode car c'est elle qui présente les meilleures caractéristiques pour les applications visées dans notre travail, en termes de sensibilité et vitesse de fonctionnement par rapport aux deux autres photos éléments [3]. La (Fig. 2.7) montre la ZCE de la photodiode.

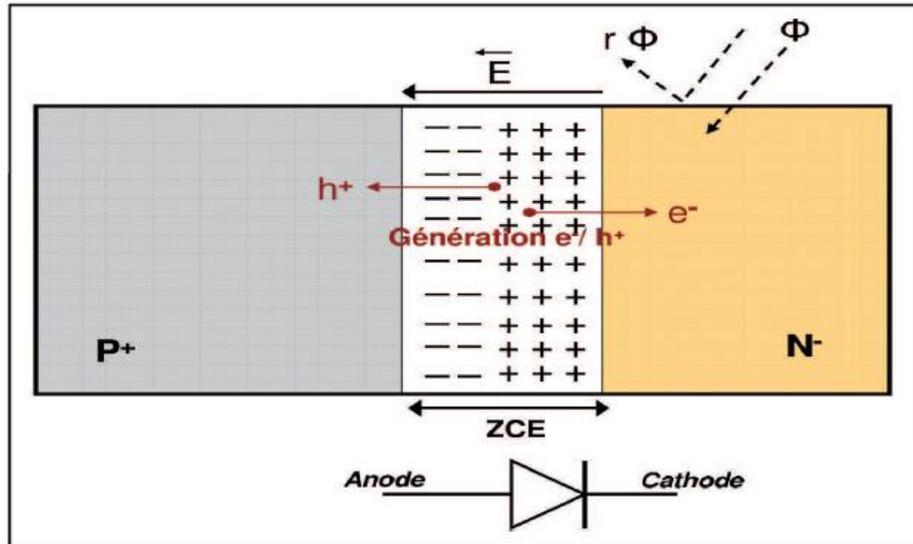


Figure 2.7 : ZCE de la photodiode

### A. Évolution du flux de photons dans un semi-conducteur :

Le flux de photons est défini comme étant le nombre de photons  $Nb$  par seconde par unité de surface :

$$\Phi = \frac{Nb}{1m^2 \times 1s} \quad (2.4)$$

Le flux de photons est important pour déterminer le nombre d'électrons générés, en le multipliant par l'énergie des photons, on obtient l'énergie frappant une surface par unité de temps, ce qui est équivalent à une densité de puissance.

On considère un rayonnement incident de photons d'énergie  $E$ . Le flux de photons incident  $\Phi_o(E)$  (nombre de photons d'énergie  $E$  qui frappent l'unité de surface de semi-conducteur par unité de temps) va en partie se réfléchir ( $\Phi_r(E)$ ) et le reste sera transmis au semi-conducteur ( $\Phi_t(E)$ ).

On appellera  $R(E)$  le coefficient de réflexion des photons d'énergie  $E$ . Le flux transmis peut donc s'exprimer de la façon suivante:

$$\Phi_t(E) = (1 - R(E)) \cdot \Phi_o(E) \quad (2.5)$$

Notons que :

$$R(E) = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 \quad (2.6)$$

Avec :

$n_1$  : indice de réfraction d'air ( $n_1=1$ )

$n_2$  : indice de réfraction du Si ( $n_2=3.4777$ )

Ce flux transmis va créer un excès de porteurs de charges en rentrant dans le matériau. En cours de propagation dans le matériau, des photons seront absorbés et le flux va donc décroître. Soit  $\alpha(E)$  le coefficient d'absorption, qui quantifie la variation relative de flux par unité de longueur. On peut écrire qu'entre  $x$  et  $x+dx$ , on a :

$$d\Phi_t(E, x) = \Phi_t(E, x + dx) - \Phi_t(E, x) = -\alpha(E) \cdot \Phi_t(E, x) \cdot dx \quad (2.7)$$

Soit, si le flux rentre dans le matériau en  $x=0$

$$\Phi_t(E, x) = \Phi_t(E, 0) \cdot e^{-\alpha(E) \cdot x} = (1 - R(E)) \cdot \Phi_0(E) \cdot e^{-\alpha(E) \cdot x} \quad (2.8)$$

## **B. Photo-courant de la jonction PN :**

Le photo-courant résultant dans la jonction PN est l'intégrale sur toutes les longueurs d'ondes de la somme de trois composantes :  $J_n$ ,  $J_p$  et  $J_d$ .

Avec :

$J_{dp}$  : courant de diffusion des électrons dans la région type P.

$J_c$  : courant de photo-génération (courant de conduction) dans la zone de charge d'espace.

$J_{dp}$  : courant de diffusion des trous dans la région type N.

La densité de courant d'électrons dans l'émetteur est donnée par :

$$Jdn = q \cdot \Phi_0 \cdot (1 - R) \cdot \frac{\alpha \cdot Ln}{(\alpha \cdot Ln)^2 - 1} \cdot \left[ \frac{\left( \frac{Sn \cdot Ln}{Dn} + \alpha Ln \right)}{\left( \frac{Sn \cdot Ln}{Dn} \cdot \sinh\left(\frac{Xj}{Ln}\right) + \cosh\left(\frac{Xj}{Ln}\right) \right)} \right] - \left[ \alpha \cdot Ln - \frac{\left[ \left( \frac{Sn \cdot Ln}{Dn} \cdot \cosh\left(\frac{Xj}{Ln}\right) + \sinh\left(\frac{Xj}{Ln}\right) \right) \right]}{\frac{Sn \cdot Ln}{Dn} \cdot \sinh\left(\frac{Xj}{Ln}\right) + \cosh\left(\frac{Xj}{Ln}\right)} \right] \cdot e^{-\alpha \cdot Xj} \quad (2.9)$$

La densité de courant des trous est donnée par :

$$Jdp = \left[ \alpha Lp - \frac{\left[ \left( \frac{Sp \cdot Lp}{Dp} \cdot \cosh\left(\frac{d}{Lp}\right) + \sinh\left(\frac{d}{Lp}\right) \right) \right]}{\frac{Sp \cdot Lp}{Dp} \cdot \sinh\left(\frac{d}{Lp}\right) + \cosh\left(\frac{d}{Lp}\right)} \right] - \left[ \frac{\left( \frac{-Sp \cdot Lp}{Dp} + \alpha Lp \right) \cdot e^{\alpha d}}{\left( \frac{Sp \cdot Lp}{Dp} \cdot \sinh\left(\frac{d}{Lp}\right) + \cosh\left(\frac{d}{Lp}\right) \right)} \right] \cdot e^{-\alpha(Xj+W)} \cdot q \cdot \Phi_0 (1 - R) \cdot \frac{\alpha \cdot Lp}{(\alpha \cdot Lp)^2 - 1} \quad (2.10)$$

Avec :

$S_n$  : la vitesse de recombinaison de surface des électrons en excès à la surface avant.

$S_p$  : la vitesse de recombinaison de surface des électrons en excès à la surface avant.

$L_n$  : longueur de diffusion des électrons dans le matériau P,

$$\text{Avec :} \quad L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} \quad (2.11)$$

$L_p$  : longueur de diffusion des électrons dans le matériau N,

$$\text{Avec :} \quad L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} \quad (2.12)$$

$\tau_n$  et  $\tau_p$  : les durées de vie des porteurs minoritaires pour les électrons et les trous, respectivement.

$D_n$  : le coefficient de diffusion des électrons.

$D_p$  : le coefficient de diffusion des trous.

$\lambda_{\min}$  : la longueur d'onde la plus petite.

$\lambda_{\max}$  : la longueur d'onde la plus grande.

Étant donné que le champ électrique dans la région de charge d'espace est élevé, les électrons et les trous générés dans ces régions sont accélérés vers les directions opposées. La densité de courant photoélectrique dans la région de charge d'espace est donnée par :

$$J_c = q \cdot \Phi_0 \cdot (1 - R) (e^{-ax_j} - e^{-a(x_j+W)}) \quad (2.13)$$

Le photo-courant  $J_{ph}$  est calculé en intégrant sur l'ensemble du spectre visible, de sorte que :

$$J_{ph} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} (J_n + J_p + J_d) d\lambda \quad (2.14)$$

### 2.2.3 Les pixels :

Il existe principalement deux façons de réaliser la commande électronique de la transduction éclairement-tension au niveau du pixel :

1. La lecture de l'information est réalisée de manière passive (pixel PPS), en lisant simplement une valeur de courant (photo-courant), via un transistor de sélection.
2. La lecture est active (pixel APS), alors le photo-courant est d'abord intégré pour traduire une différence de potentiel proportionnelle à l'éclairement.

#### A. Pixel passif PPS :

Le pixel analogique passif ou PPS (Passive Pixel Sensor), présente l'architecture la plus simple, dans l'ensemble des imageurs CMOS.

Comme le montre la (fig. 2.8), ce pixel inclut une photodiode et un transistor de sélection. Un convertisseur courant-tension est placé au bas de chaque colonne de l'imageur. Pendant l'intégration, le photo-courant est régi par l'équation (2.15).

$$i(t) = C \frac{d(V_{ref}-V_{sortie})(t)}{dt} = -C \frac{dV_{sortie}(t)}{dt} \quad (2.15)$$

Avec :

C : capacité du condensateur d'intégration.

V<sub>sortie</sub> : tension de sortie du pixel.

V<sub>ref</sub> : tension de référence du comparateur.

À la fin de l'intégration, le potentiel V<sub>sortie</sub> est une image de l'éclairement du pixel. Le condensateur de l'intégrateur est ensuite court-circuité via le transistor RAZ, pour en dissiper la charge, avant la lecture de la ligne suivante.

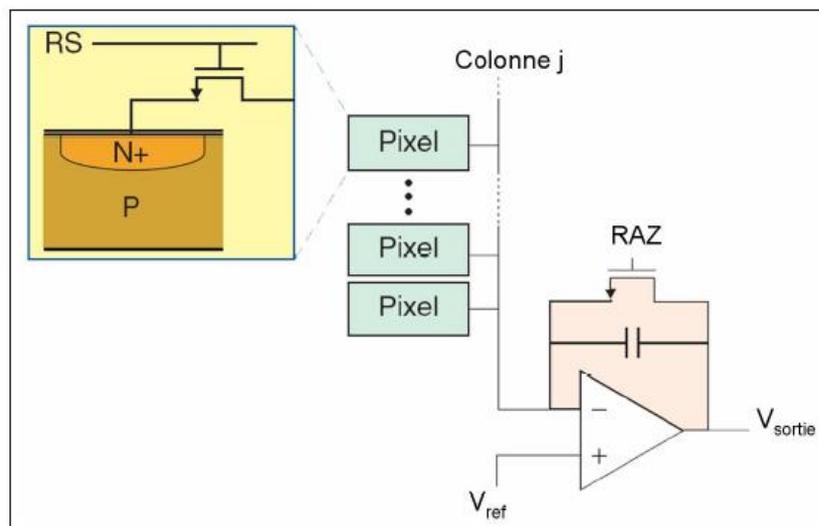


Figure 2.8 : Architecture du pixel passif PPS

Cette architecture de pixel présente l'avantage de ne comporter qu'un seul transistor, ce qui permet de réaliser des pixels de très petite taille avec un taux de remplissage proche de 100%. Cependant, cette structure de pixel est assez susceptible aux perturbations électromagnétiques conduites internes à l'imager. Le bruit de colonne, induit par les non uniformités des convertisseurs courant-tension, s'avère non négligeables, ce qui limite fortement leur utilisation. Les pixels APS résolvent ce problème, mais au prix de transistors supplémentaires.

## B. Capteurs actifs APS (Active Pixel Sensor) :

Contrairement au pixel passif, où le signal véhiculé est constitué de la charge accumulée à une borne de la diode, le pixel actif peut transmettre à sa sortie n'importe quel type de signal, selon le choix du concepteur. Plusieurs types de cellules, significativement différentes, sont donc présentés ici et sont identifiées selon le mode de propagation de leur signal de sortie. Il s'agit des modes tension, courant et impulsions.

### I. Mode Tension :

Une cellule typique de capteur actif à photodiode possède trois transistors, tel que schématisé à la (Fig. 2.9). Pour la décrire, expliquons sa procédure d'utilisation. Afin d'initialiser la cellule, avant chaque cycle de lecture, une impulsion sur l'entrée *RST* ramène le potentiel de la diode à la tension de référence, dans ce cas *VDD*. La période d'intégration suit. Pendant cette période, le photocourant fait baisser la tension présente aux bornes de la diode. Lorsque vient le temps de la lecture, une impulsion *RD* est envoyée à la grille de *M3*, activant ainsi la cellule. La tension *Vout*, dépendant de la tension aux bornes de la diode peut donc être lue par l'amplificateur de colonne (connecté à *Vout*) via le suiveur *M2* alors polarisé par la source de courant.

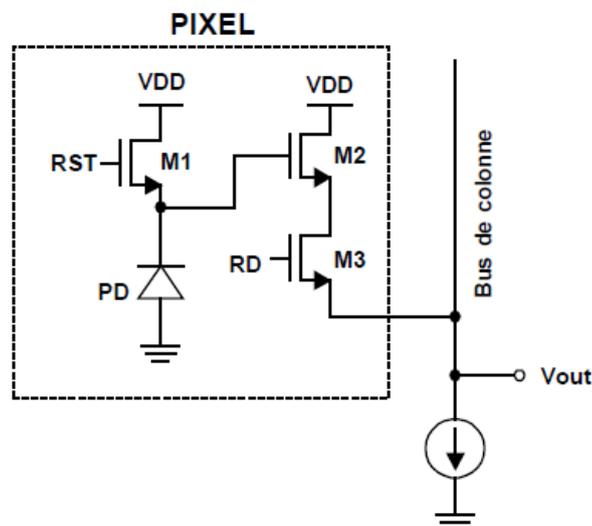


Figure 2.9 : Montage d'un pixel en mode tension

Il est à noter que le type de composants peut être changé selon la nature du substrat ou du puits dans lequel les éléments sont fabriqués. Ainsi, une diode connectée à  $VDD$  et trois transistors à canal 'P' peuvent aussi bien être utilisés pour arriver aux mêmes fins. Ce commentaire est d'ailleurs valide pour tous les types de cellules présentés dans ce mémoire.

## II. Mode courant :

Au lieu de lire directement le voltage aux bornes de la diode à l'aide d'un suiveur de tension, il est possible de convertir ce signal en courant. Le fonctionnement est très similaire à celui décrit à la section I), cependant le courant sur le bus de colonne n'est pas fixé par une source de courant de polarisation, mais est plutôt variable et dépend de la tension aux bornes de la photodiode et de l'amplificateur de transconductance  $M2$  (Fig. 2.10).

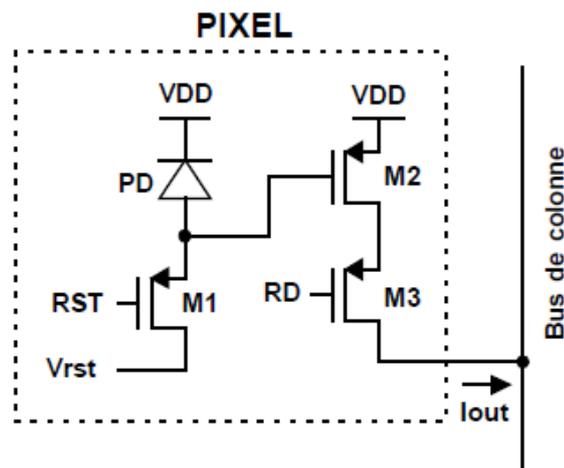


Figure 2.10 : Montage d'un pixel en mode courant

Cette approche présente certains avantages comparativement au mode tension présenté plus haut, dont les principaux sont [9] :

- la possibilité de choisir un gain au gré du concepteur, via l'amplificateur  $M2$ , permettant de lire le signal de sortie avec plus d'aisance, sur une plage choisie, et ainsi d'améliorer le rapport signal sur bruit en lecture ;

- la possibilité de réduire la consommation globale du circuit en abaissant la tension d'alimentation de façon significative, sans pour autant affecter la plage dynamique du signal d'intérêt ;
- la diminution des variations de la tension au nœud de sortie, réduisant ainsi les charges et décharges des importants condensateurs parasites au niveau des bus de colonnes, améliorant ainsi la vitesse de lecture.

Cependant, le gain de transconductance apporté par le transistor ne procure pas que des avantages. En effet, il accentue de façon significative le bruit spatial dont la correction a toujours été problématique.

Le lecteur notera qu'une tension supplémentaire d'initialisation est nécessaire pour le bon fonctionnement de la cellule en mode courant ( $V_{rst}$ ). Ceci vient du fait qu'au delà d'une certaine tension  $V_{gs}$  à la grille de  $M2$ , le courant  $I_{out}$  atteint sa limite et toute variation de tension ne procurera aucun effet détectable à la sortie. Il convient donc de fixer la tension  $V_{rst}$  à cette tension limite de manière à ce que l'intégration soit efficace dès les premiers instants. Ce signal de référence supplémentaire n'affecte cependant pas la taille de la cellule puisque, dans ce cas-ci, une seule alimentation est suffisante ( $VSS$  en moins). Le nombre de ligne de contrôle et d'alimentation au travers de la matrice reste donc le même que pour le mode tension.

### **III. Mode logarithmique :**

Un capteur fonctionnant en mode logarithmique est intéressant car, par la nature de sa réponse, il réalise des mesures dans une plage d'éclairement importante.

Le mode logarithmique présente cependant des inconvénients. Du fait de son comportement logarithmique, les informations en sortie ont une dynamique très petite dans la plupart des scènes observées, ce qui cause des problèmes de quantification et de rapport signal sur bruit [1]. En effet, ce comportement est utile dans les scènes très fortement contrastées, mais le signal a une dynamique faible dans les scènes à contraste moyen. Au niveau du pixel, le transistor de Reset de la structure à intégration du photocourant est connecté pour fonctionner comme une diode. Les deux autres transistors ont les mêmes rôles (un suiveur et un sélecteur).

Le principal défaut du mode logarithmique provient du transistor fonctionnant en diode.

Un exemple de schéma d'un pixel logarithmique est détaillé (Fig. 2.11)

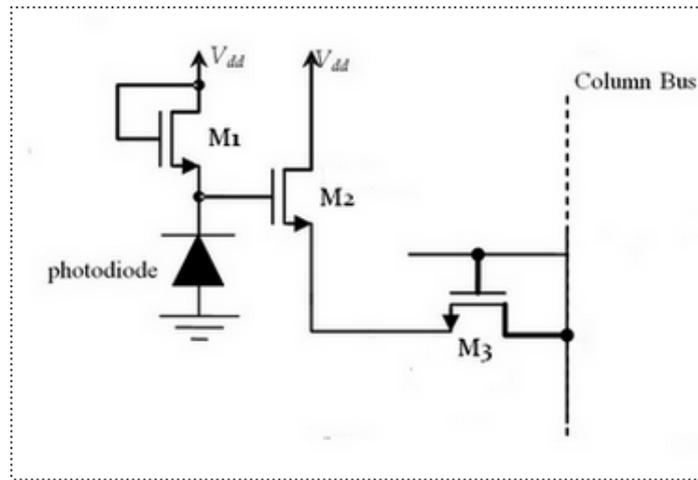


Figure 2.11 : Montage d'un pixel en mode logarithmique

### C. Les pixels « global shutter » à quatre transistors :

Ce type de pixel est constitué de quatre transistors, trois sont visibles sur la (Fig 2.12) et le quatrième est le transistor de transfert qui est au niveau de la photodiode PIN qui permet d'isoler la photodiode du noeud commun  $V_{ph}$  (Fig. 2.12).

Le fonctionnement de ce genre de pixel se fait en trois phases (Fig 2.13).

1. Le transistor de reset est inactif (bloqué) ce qui laisse les charges s'accumuler dans la photodiode PIN qui est isolée du noeud  $V_{ph}$  par le transistor de transfert, ce dernier étant commandé par la tension "TG" (Fig 2.12).

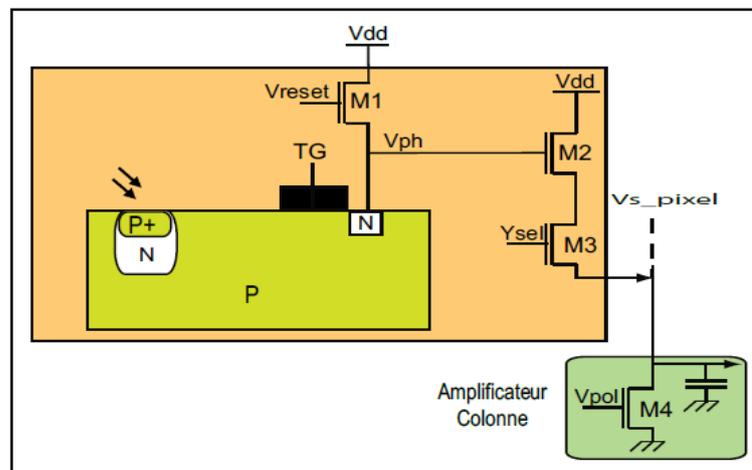


Figure 2.12 : Pixel à "global shutter" à quatre transistors

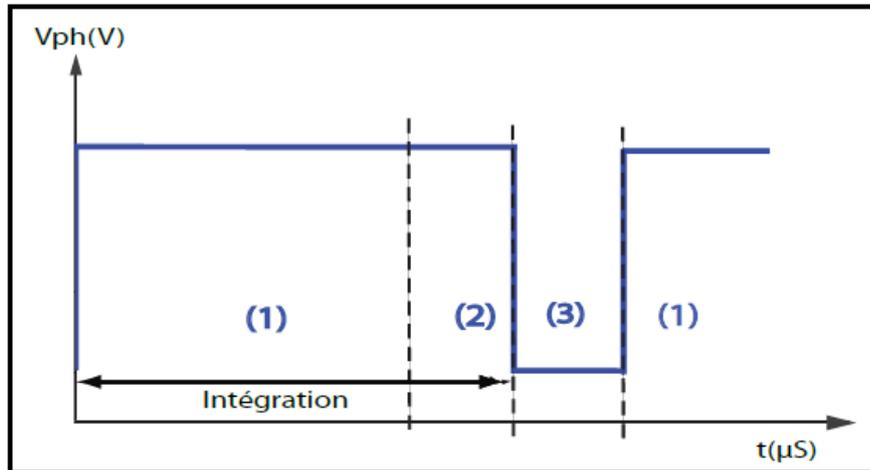


Figure 2.13: Fonctionnement transitoire des pixels à "global shutter" à quatre transistors

2. Le transistor de reset est actif (passant), ce qui précharge le nœud  $V_{ph}$  à la tension de  $V_{reset}$ .

3. A la fin du temps d'intégration, la tension "TG" active la grille de transfert ce qui libère les charges accumulées dans la photodiode PIN. Puis elles sont transférées vers la capacité de grille du transistor M2. Cette tension est lue classiquement (Fig 2.12).

En raison du faible courant d'obscurité de la photodiode PIN et d'un grand facteur de conversion, cette architecture est très utilisée pour la conception des imageurs par les industriels. Surtout qu'elle présente, en plus, une intégration facile des techniques de réduction de bruit des imageurs [3].

#### 2.2.4 Le circuit de lecture colonne :

Le rôle du circuit de lecture colonne est d'amplifier le signal reçu de la photodiode, et ensuite d'acheminer séquentiellement ce signal au convertisseur analogique numérique (CAN). Il nous permet d'échantillonner et de stocker deux informations, celle du signal et celle du reset (capteur à intégration) ou référence (capteur à réponse logarithmique).

Cela permet l'application des méthodes de réduction de bruit spatial fixe (FPN), à titre d'exemple les techniques CDS, NCDS et DDS, voir (Fig. 2.14). On verra, à la fin de ce chapitre, ces différentes méthodes de réduction de bruit FPN. Il est à noter aussi une grande contrainte imposée par l'utilisation d'un amplificateur colonne : il doit avoir une

largeur identique à la largeur du pixel étant donné qu'on a un amplificateur par colonne [3].

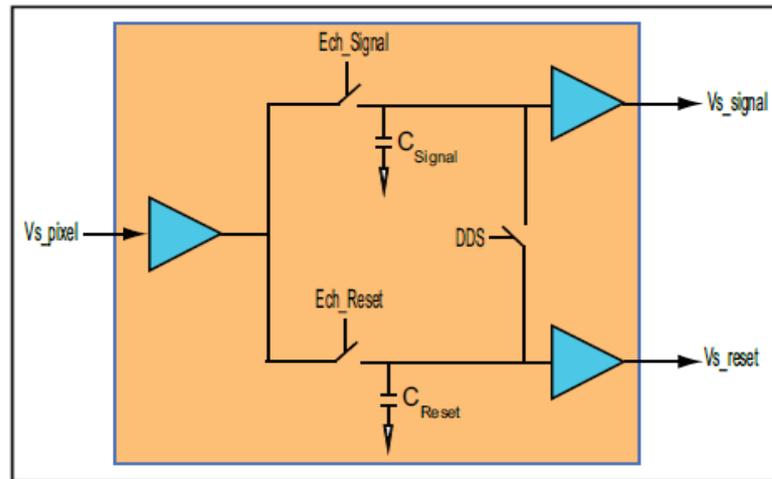


Figure 2.14 : Schéma bloc d'un amplificateur colonne

Ces circuits de lecture colonne sont connus sous le nom d'amplificateurs colonne. Le nom d'amplificateur colonne est dû au fait qu'on ait un amplificateur pour chaque colonne de la matrice photosensible. Il faut savoir qu'il existe des imageurs à un seul amplificateur colonne.

### 2.2.5 La conversion analogique numérique :

La conversion de la tension analogique en signal numérique dans les capteurs d'images, peut être à l'intérieur ou à l'extérieur du capteur. Par contre, pour préserver l'intégrité du signal, il est préférable que cette conversion soit au sein même du capteur [3]. Il existe différents types de convertisseurs :

- Simple rampe
- Double rampe
- Flash
- Pipeline
- Sigma delta

Pour cela, on dispose de plusieurs méthodes ayant chacune ses avantages et ses inconvénients :

- Un convertisseur pour toute la matrice.
- Un convertisseur par colonne.
- Un convertisseur par pixel.

### a) La conversion pour toute la matrice

L'idée est d'avoir un CAN pour toute la matrice photosensible, ce qui implique un convertisseur rapide qui par conséquent consomme beaucoup.

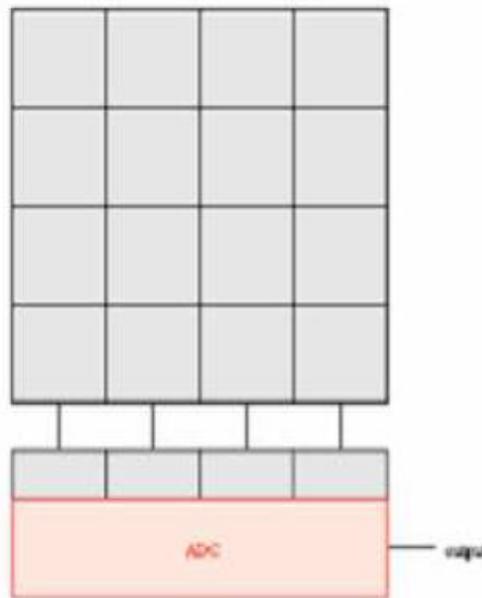


Figure2.15 : schéma d'un convertisseur pour toute la matrice.

### b) La conversion au niveau des amplificateurs colonnes :

Dans cette deuxième méthode, il s'agit d'avoir un CAN pour chaque colonne de la matrice. Le temps de conversion au niveau des amplificateurs colonnes de l'imageur est moins rapide par rapport à la première méthode. L'inconvénient réside dans la réalisation d'un convertisseur pour chaque colonne ayant une largeur équivalente à celle d'un pixel [3].

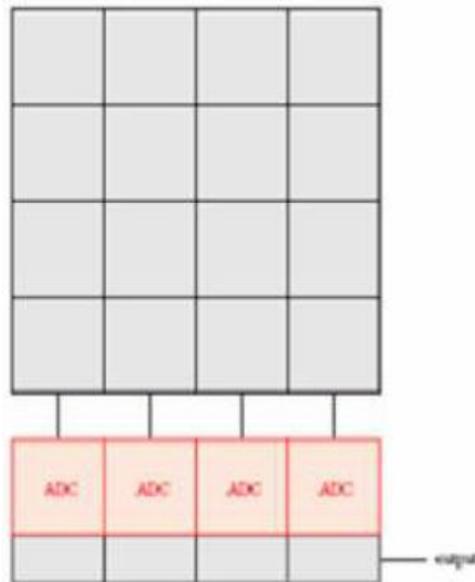


Figure 2.16 : Schéma d'un convertisseur par colonne.

### c) La conversion au sein des pixels :

Dans cette troisième méthode, l'idée est d'avoir un CAN dans chaque pixel. Grâce à la conversion au sein du pixel, les pixels peuvent être lus à grande vitesse, de manière parallèle, permettant ainsi la suppression du bruit spatial fixe apporté par les amplificateurs colonnes. Le mode de capture instantané peut être implémenté facilement grâce à la présence de la mémoire au sein du pixel, ce qui présente un autre avantage de cette méthode par rapport aux autres. Cette méthode nécessite des transistors en plus dans le même pixel, donc des pixels plus grands et une surface de la partie photosensible (facteur de remplissage) beaucoup plus petite et par conséquent une sensibilité plus faible du capteur. Par contre, étant donné le grand progrès et l'avancement de la technologie microélectronique, cette méthode est possible. Le schéma bloc spécifique des pixels à sortie numérique est présenté dans la (fig. 2.17).

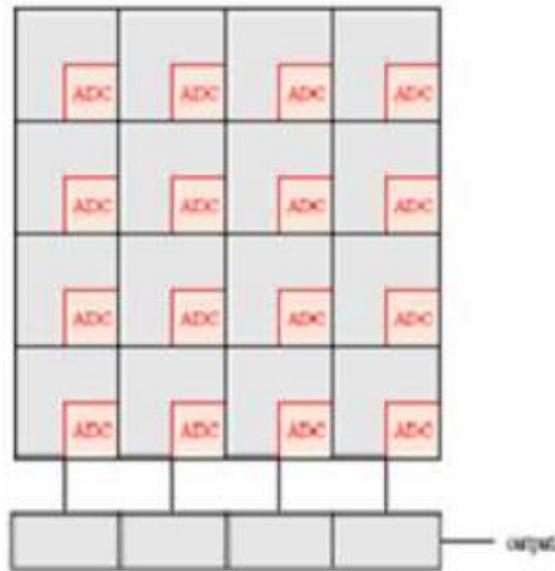


Figure 2.17 : schéma d'un convertisseur par pixel.

Ce pixel à sortie numérique est composé d'une photodiode, d'un CAN et d'une mémoire par pixel. La conversion au sein de chaque pixel peut aussi s'effectuer suivant le principe des CAN à simple rampe comme illustré par la (fig. 2.18).

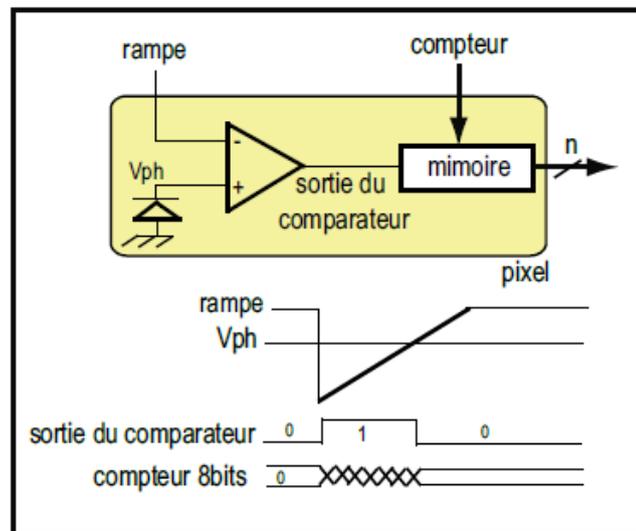


Figure 2.18 : Schéma de pixel à sortie numérique à convertisseur simple rampe [3]

## 2.3 Le bruit :

Le bruit dans les imageurs APS est une caractéristique très importante. C'est cette caractéristique qui permet de capter ou non les faibles flux lumineux.

On trouve plusieurs types et sources de bruits, mais on constate deux types essentiels : le bruit temporel et le bruit spatial fixe (FPN).

### A. Le bruit temporel :

C'est tout signal aléatoire dans le temps, indésirable qui vient s'ajouter au signal de sortie du capteur. Plusieurs sources peuvent en être à l'origine.

### B. Le bruit thermique :

Généré par les résistances ou composants actifs d'un circuit intégré constitue une source de bruit interne. Le facteur le plus important c'est la variation de température qui influence le mouvement aléatoire des charges (électrons) comme il est mentionné dans l'équation (2.16) de sa densité de puissance en courant :

$$S(f) = 4 \frac{kT}{R} \quad (2.16)$$

Où on a : "k" constante de Boltzmann avec  $k = 1,3806503 \times 10^{-23}$  en  $[m^2 \text{ kg}^{-2} \text{ K}^{-1}]$  ; "R" la partie résistive du composant en  $[\Omega]$  ; "T" la température absolue du milieu en [K].

### C. Le bruit de grenaille :

C'est un bruit qui dépend juste du courant qui traverse le composant, voir l'équation (2.17) de sa densité :

$$S(f) = 2qI \quad (2.17)$$

Avec : "q" la charge de l'électron  $-1,60217653 \times 10^{-19}$  en [coulomb] ; "I" courant traversant le composant en [A]

#### **D. Le bruit flicker :**

On l'appelle aussi le bruit 1/f, bruit de scintillement, bruit de papillotement, bruit de basse fréquence. Il est toujours présent dans les composants actifs et dans certains composants passifs. Ses origines sont variées : il peut être dû, par exemple à des impuretés dans le matériau pour un transistor, par exemple, qui libèrent aléatoirement des porteurs de charge, ou bien à des recombinaisons électron - trou parasites, etc.

Les trois types de bruits influent sur le signal des imageurs. Chaque élément du capteur est influencé par un ou plusieurs bruits. Généralement, dans la photodiode on constate qu'elle est beaucoup influencée par le bruit de grenaille. Par contre, au niveau du suiveur et de l'amplificateur colonne on constate qu'ils sont influencés par les trois types de bruit [3].

#### **E. Le bruit spatial fixe :**

On le définit par la variation des valeurs des tensions de sorties des pixels sous la même illumination, cela s'explique par le fait de la présence de dispersions technologiques lors de la réalisation du circuit. On en trouve deux types [3] :

##### **- Le bruit spatial fixe pixel :**

On le trouve au niveau du pixel et il est essentiellement dû à :

- la variation du courant d'obscurité dans la photodiode ;
- la variation de l'aire de la photodiode qui n'est pas pareil d'un pixel à l'autre (cela influe sur le gain) ;
- la variation aussi de la taille des transistors de lecture (qui affecte l'offset).

### - Le bruit spatial fixe colonne :

Comme son nom l'indique, il est présent spécialement dans les amplificateurs colonne. Ce type de bruit est dû à la variation du courant de polarisation dans les circuits de colonne. Le bruit spatial fixe total est la somme du bruit spatial fixe pixel et du bruit spatial fixe colonne.

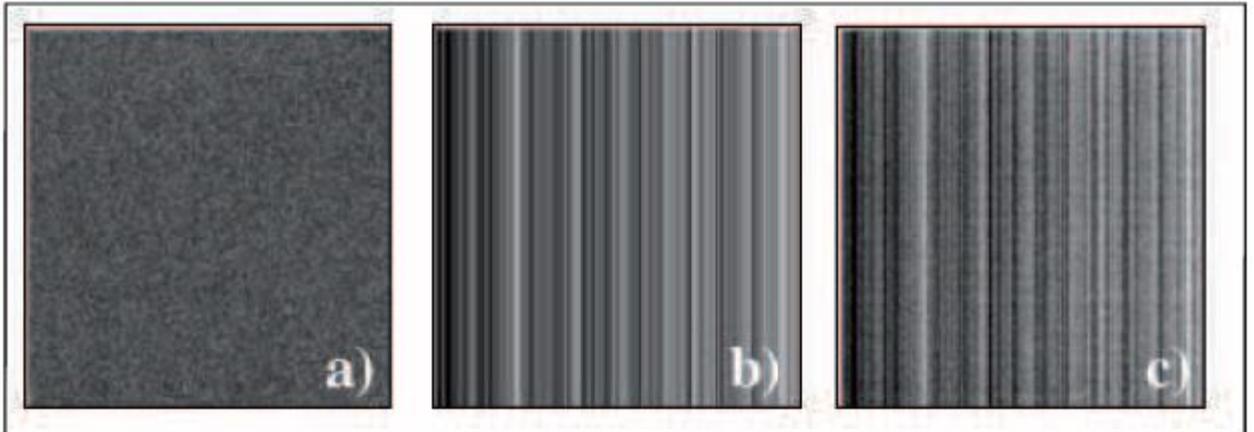


Figure 2.19 : Bruit FPN, a) bruit spatial fixe pixel, b) bruit spatial fixe colonne, c) bruit spatial fixe total [3]

La (fig. 2.19(a)) présente le bruit FPN dans le pixel. Par contre, la (fig. 2.19(b)) montre le bruit colonne, on constate que le bruit est le même pour une colonne donnée, en revanche il est différent d'une colonne à une autre. La (fig. 2.19(c)), illustre la somme de ces deux bruits FPN pixel et bruit colonne.

## 2.4 Techniques de réduction du bruit :

Ces techniques nous permettent d'avoir une grande réduction de bruit au niveau des sorties des amplificateurs colonnes. Elles seront réalisées durant l'acquisition de l'image et la mise en œuvre électronique se fera à tous les niveaux du capteur (pixel, amplificateur colonne et circuit). Il existe trois techniques essentielles de réduction de bruit. Les techniques CDS et NCDS corrigent le FPN pixel et celui du premier suiveur.

## I. Double Échantillonnage Corrélé (CDS) :

Elle est connue sous le nom CDS "Correlated Double Sampling". Le principe de fonctionnement est de réaliser deux lectures successives d'un même pixel pendant la lecture de la même trame (fig. 2.20) :

- Une première lecture du niveau du reset après l'ouverture du transistor de sélection.
- Une deuxième lecture du niveau du signal après l'étape d'intégration du signal.

Ensuite pour effectuer la réduction du bruit on soustrait ces deux mesures (Fig. 1.29). La soustraction de ces deux niveaux permet de s'affranchir du bruit de remise à zéro du pixel, du bruit en  $1/f$  et du bruit spatial fixe des pixels.

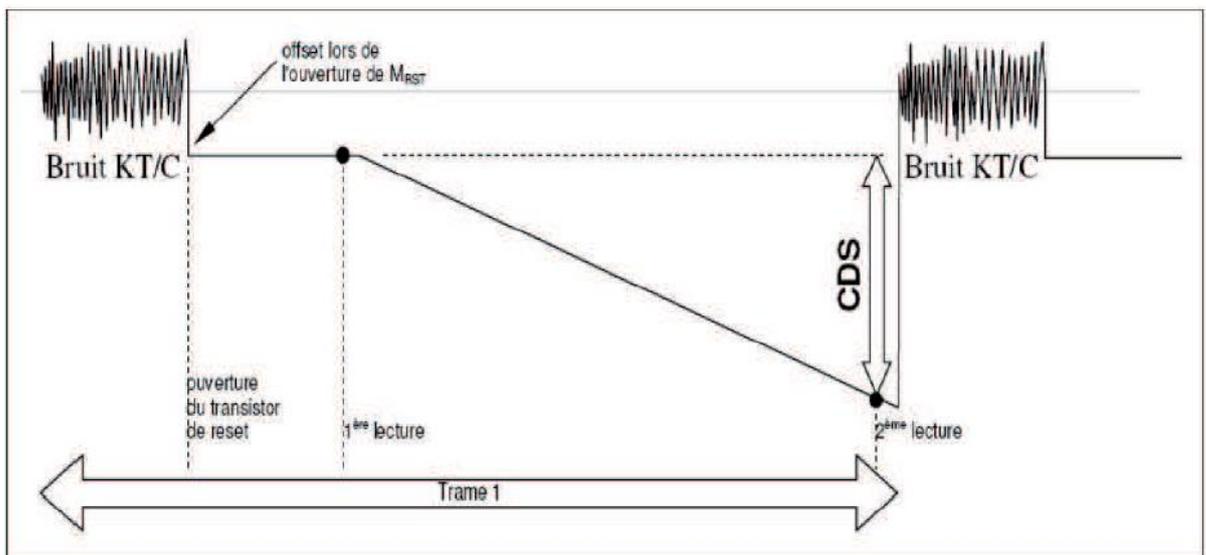


Figure 2.20 : Technique de réduction de bruit CDS [3]

Étant donné que cette technique nécessite la mémorisation de la valeur de reset avant intégration, qui dit mémorisation en analogique dit capacité, l'ajout d'une telle capacité impactera la surface du circuit et bien évidemment le coût de fabrication. L'inconvénient de cette méthode est la grande capacité de mémorisation nécessaire [3].

## II. Double Échantillonnage Non Corrélé (NCDS) :

Elle est appelée NCDS pour "Non Correlated Double Sampling". Contrairement à la CDS illustrée ci-dessus, la NCDS est beaucoup plus facile à mettre en oeuvre. Cette technique ne nécessite pas une grande capacité de mémorisation. La lecture du niveau du reset se fait juste après la lecture du niveau du signal. Cela dit, il y a un impact sur le bruit électronique (on les somme ici au lieu de les soustraire dans le CDS) (Fig. 2.21). Lecture faite, on fait la soustraction des deux valeurs avant envoi au CAN.

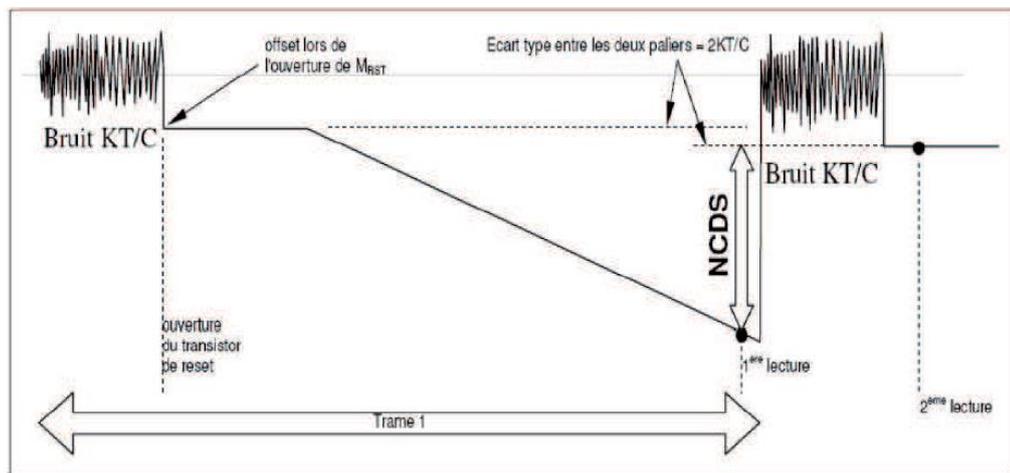


Figure 2.21 : Technique de réduction de bruit NCDS [3]

## III. Double Échantillonnage Delta (DDS) :

Appelée DDS pour "Double Delta Sampling". Le principe de son fonctionnement est de court-circuiter les deux capacités de mémorisation de signal "CS" et celle du reset "CR" en fermant l'interrupteur "DDS" (voir (fig. 2.14)), puis mesurer le décalage en tension à leurs sorties. L'objectif de cette méthode est de compenser le bruit spatial fixe des suiveurs PMOS des amplificateurs colonnes.

## **2.5 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons détaillé la chaîne de l'image dans les capteurs d'image CMOS, à savoir la photo détection et la conversion en tension, effectuées au sein des pixels, l'amplification et le multiplexage effectués au sein des circuits colonnes et la conversion analogique numérique.

Nous avons aussi présenté les différentes caractéristiques des capteurs d'images, telles que les différentes architectures des pixels, les différents montages de capteur, les méthodes de conversion et le bruit et ses techniques de réduction.

Nous allons maintenant décrire la conception du capteur implémenté durant ce mémoire, ses spécifications et l'étude de ses architectures.

**Chapitre III**  
**Étude et conception du**  
**capteur CMOS**

# Chapitre 3 Étude et conception du capteur CMOS

---

## 3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons l'architecture du capteur et les choix technologiques afin de mener à bien cette étude théorique. Les caractéristiques principales de l'architecture du capteur sont décrites dans la section 3.4 où une discussion sur l'architecture du pixel et le mode de fonctionnement a été faite, ainsi que sur les détails du convertisseur analogique numérique et la mémoire qui emmagasine les mots binaires sortant du convertisseur provisoirement. La section 3.5 s'articule autour des paramètres du capteur, sur sa taille, son mode d'acquisition séquentiel et sur le temps d'acquisition. Enfin, la section 3.6 présente les micros-lentilles qui nous permettent d'augmenter le facteur de remplissage ainsi que leurs étapes de fabrication détaillées.

## 3.2 Contexte :

Une image de la rétine est prise par le capteur, elle sera ensuite traitée afin de positionner le point d'incidence sur la rétine dans un processus de photocoagulation au laser. L'image est capturée une deuxième fois pour contrôler le positionnement du faisceau laser, Figure 3.2. Sur ce principe nous avons commencé notre étude dans le but de réaliser un capteur aux caractéristiques adéquates pour remplir cette tâche. On a effectué des recherches dans l'intérêt de prendre l'image directe de la rétine c'est à dire l'image obtenue étant la rétine elle-même, nous nous sommes confrontés à l'impossibilité de capturer la rétine avec un simple capteur. Pour la rendre possible, il faut utiliser tout un système basé sur l'optique adaptative. Ces systèmes sont très compliqués à réaliser et prennent beaucoup d'espace, nous avons pensé à une autre solution, cette solution nous l'avons trouvé dans une information très importante et utile sur laquelle notre travail était basé : « Chaque point de la pupille a un point qui lui correspond dans la rétine, donc on peut prendre une image de la pupille qui est possible, ensuite avec des calculs qui vont être effectués on obtiendra

le point correspondant dans la rétine. Après avoir fait une étude sur l'œil d'une part et les capteurs d'images d'autre part, nous avons constaté que prendre une photo de la rétine avec un simple capteur n'est pas possible, en conséquence, nous avons décidé de capturer la pupille étant donné que chaque point de cette dernière a un point qui lui correspond sur la rétine.

Nous avons donc conçu un circuit composé d'un nombre de pixels important, où on peut accéder à l'information contenue dans chaque pixel, avec une dynamique fixe et une vitesse convenable, tout en répondant aux conditions liées au processus de photoreception-traitement-photocoagulation, Figure 3.1.

Nous avons utilisé pour ce circuit, la technologie TSMC 0.18 $\mu$ m, et le principe d'acquisition d'une image pour mémorisation dans chaque colonne de manière binaire.

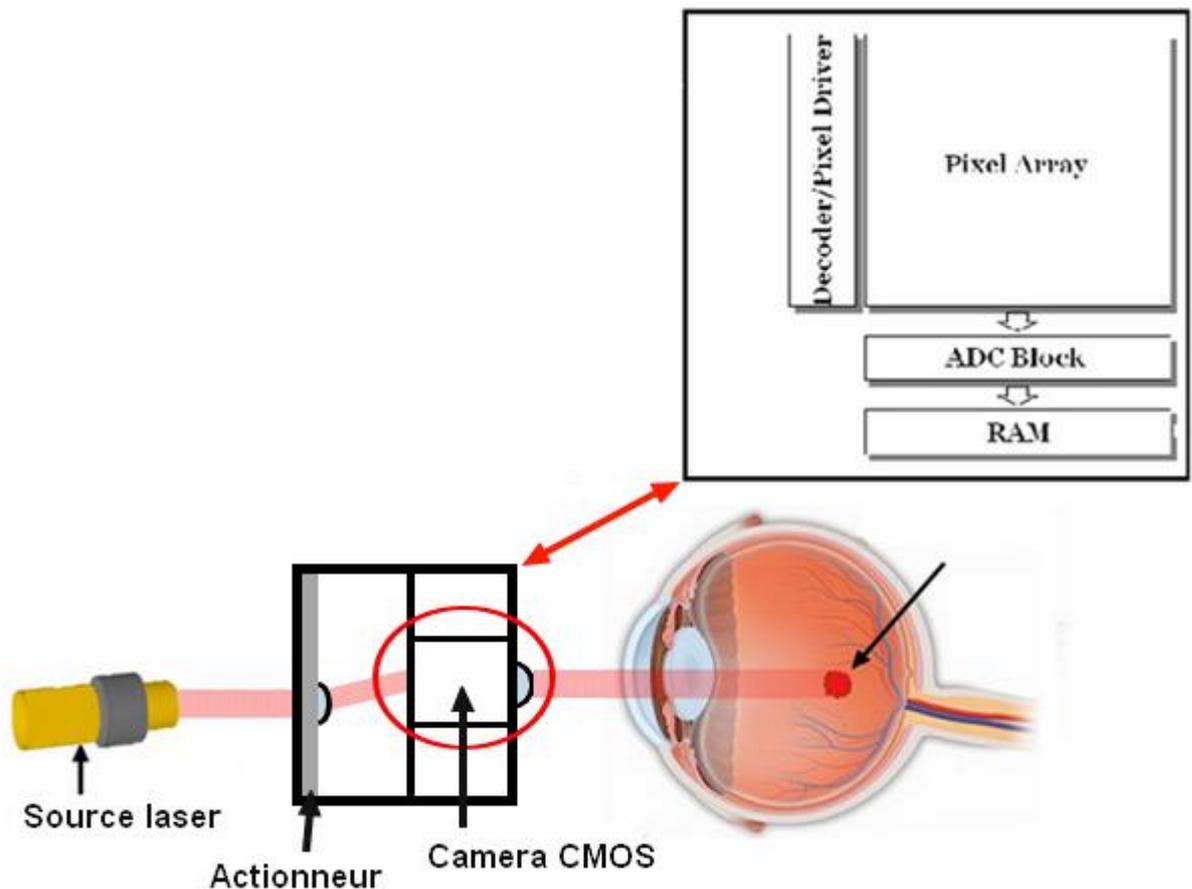


Figure 3.1 : Architecture du système global

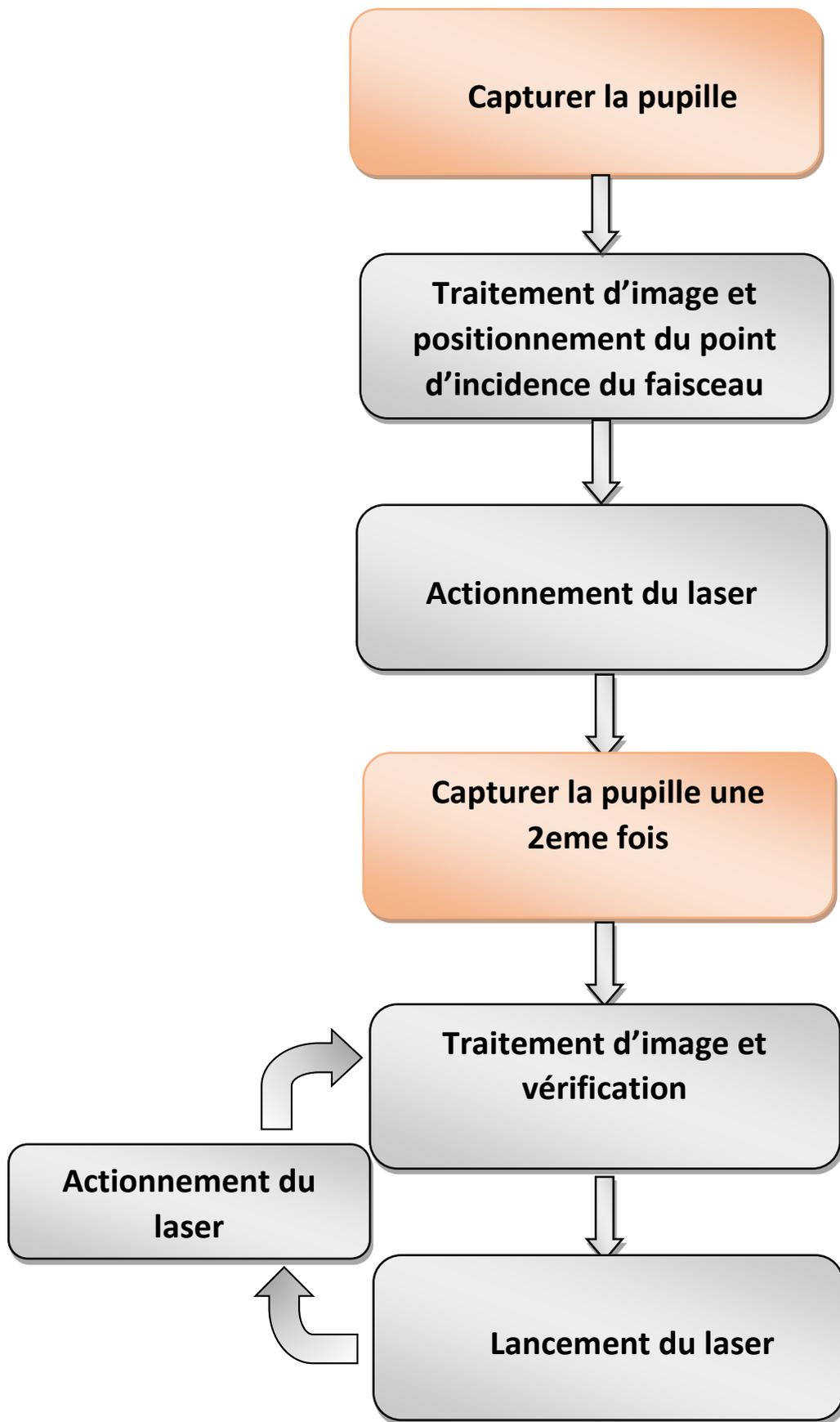


Figure 3.2 : Schéma synoptique du fonctionnement du système

### 3.3 Architecture du capteur :

La dimension désirée de la matrice de pixels est de M colonnes par N rangées. Chaque pixel (cellule) est constitué d'une photodiode, de commutateurs de contrôle et d'un amplificateur de courant de sortie. L'activation des cellules pour la lecture est contrôlée par des registres à décalage, ainsi que des circuits logiques situés dans le bloc de contrôle de rangées. Des circuits de réduction du bruit spatiale éliminent la majorité du bruit spatial introduit par les transistors d'amplification inclus dans les photocellules. De plus, dans le but de simplifier la logique de contrôle, celle-ci doit correspondre à la description donnée à la section 1.4.3 et illustrée à la Figure 1.12. La seule différence est l'utilisation d'un CAN à chaque colonne, d'une part pour augmenter la vitesse d'acquisition, et d'autre part elle est bien adaptée aux capteurs CMOS puisque les rangées de pixels sont électriquement indépendantes, de plus, elle permet l'utilisation de convertisseurs fonctionnant à une vitesse moindre.

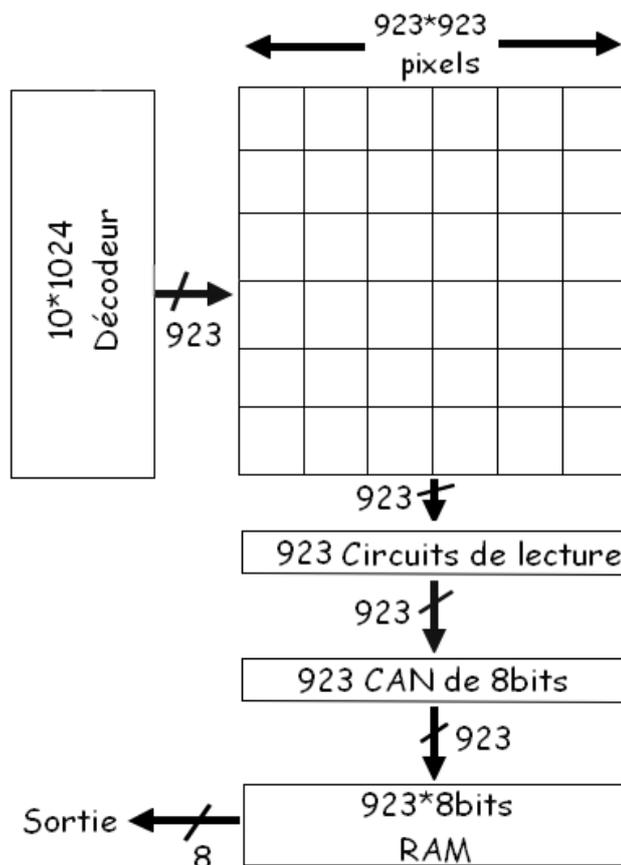


Figure 3.3 : Architecture du capteur CMOS

### 3.3.1 Matrice photosensible :

Pour calculer la résolution de notre capteur nous avons fait appel aux lois d'optique.

Tout d'abord nous avons calculé la distance entre l'objectif du capteur et la matrice photosensible.

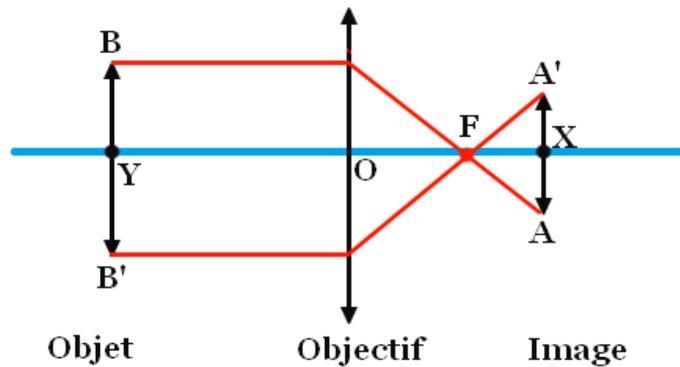


Figure 3.4 : projection d'un objet sur la matrice photosensible

Et puisque l'objet à capturer va se projeter inversement sur la matrice grâce à l'objectif on a :

$$\frac{1}{OF} = \frac{1}{OX} + \frac{1}{OY} \quad (3.1)$$

Avec :

OF : distance focale = 5mm

OY : distance entre l'objectif et l'objet = 2cm

OX : distance entre l'objectif et la matrice

Donc :

$$OX = 6.6\text{mm}$$

Passant maintenant au grandissement (calcul du rapport entre la largeur de l'objet et la largeur de son image sur la matrice : largeur de l'objet = facteur grandissement \* largeur de l'image)

On a :

$$G = \frac{BB'}{AA'} \quad (3.2)$$

Donc :

$$G = 0.33$$

Dans notre cas l'objet c'est la pupille et le diamètre maximal qu'elle peut atteindre est :  
7mm

$$\text{Longueur de l'image} = 7 * 0.33 = 2.31 \text{ mm}$$

Comme la matrice est carrée donc la taille de l'image =  $2.31 * 2.31 = 5.3361 \text{ mm}^2$

$$N = \frac{(AA')^2}{(\text{taille de pixel})^2} \quad (3.3)$$

Avec :

AA' : largeur de l'image

$$\text{Taille de pixel} = 6.25 \mu\text{m}^2$$

Alors :

La résolution  $N = 851929$  pixels

Donc la matrice photosensible est de 923 lignes par 923 colonnes.

### **3.3.2 Pixels APS :**

L'objectif est de minimiser le bruit total et d'isoler le photodétecteur des bus de colonne. Pour ce faire, on choisit d'utiliser une structure de pixel actif à 3 transistors. En conception standard des capteurs CMOS, les transistors jouent un rôle essentiel pour arriver à la taille optimale de pixel et ils déterminent le facteur de remplissage.

#### **3.3.2.1 Architecture du pixel :**

Chaque pixel est constitué d'une photodiode PN qui a pour rôle de convertir un flux lumineux incident en une tension électrique, d'un transistor de remise à zéro servant à charger le nœud « S » à une valeur de reset donnée, un amplificateur qui alimente les bus de colonne et un transistor de sélection de pixel.

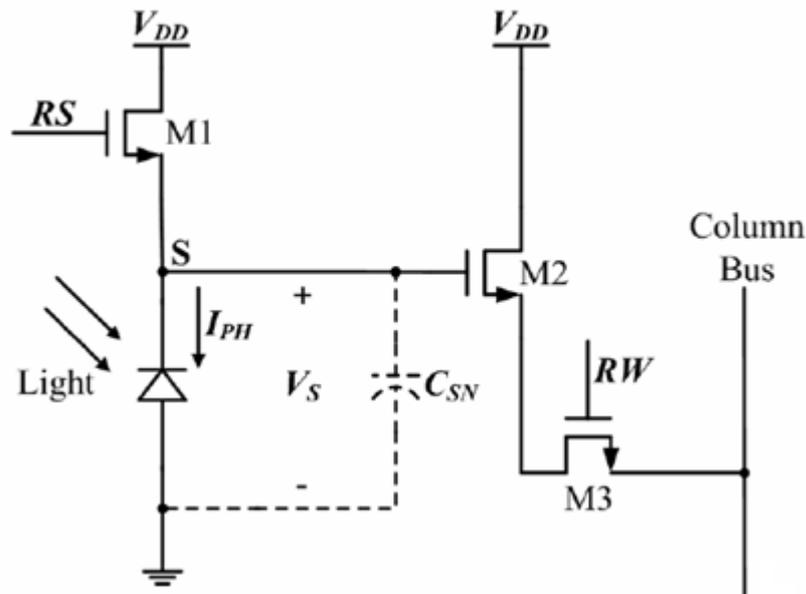


Figure 3.5 : Architecture du pixel 3T

### 3.3.2.2 Mode de fonctionnement :

Pour notre capteur nous avons choisi un pixel 3T monté en mode tension (Fig. 3.5), car le mode courant étant dédié pour la lecture en continu et le mode logarithmique ayant une faible dynamique).

Le mode tension présente de nombreux avantages : dynamique connue et fixe, il nous permet d'éviter les problèmes liés au faible photocourant et les techniques de réduction de bruit sont facilement utilisables.

### 3.3.3 Le convertisseur simple rampe :

Nous avons utilisé pour notre capteur un convertisseur simple rampe avec une résolution de 8 bits. A la valeur de la tension d'entrée, on fait correspondre une impulsion dont la largeur est proportionnelle à cette tension. Cette impulsion vient contrôler l'autorisation à s'incrémenter d'un compteur. On génère ainsi le code binaire de sortie en comptant plus ou moins longtemps en fonction de l'amplitude du signal à convertir.

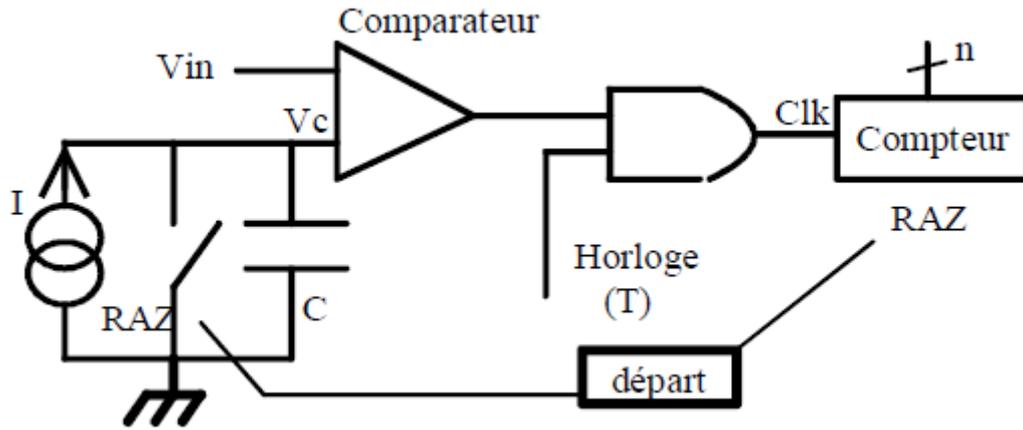


Figure 3.6 : schéma fonctionnel d'un convertisseur simple rampe

### Phases de fonctionnement :

Phase 1 : RAZ  $V_c=0$  et  $N=0$

Phase 2 : Intégration aux bornes du condensateur sous un courant constant tant que la tension du condensateur  $V_c$  est inférieure à la tension à convertir  $V_{in}$ .

$$V_c = \frac{I_0}{C} * \Delta T \quad (3.4)$$

Avec :

$$I_0 = 150 \text{ nA}$$

$$C = 11 \text{ pF}$$

$$\Delta T = N * T \quad , N : \text{mot binaire, } T \text{ période de l'horloge système} = \frac{1}{f} \text{ , avec } f = 2.4 \text{ Mhz}$$

### Temps de conversion :

$$T_c = [2^n - 1] * T \quad (3.5)$$

Avec :

$n$  : la résolution = 8bits

Alors :  $T_c = 0.1 \text{ ms}$ .

$V_c < V_{in} \Rightarrow$  on compte tous les T.

Phase 3 :  $V_c = V_{in}$

Le comparateur bascule et bloque le compteur à sa dernière valeur N.

### 3.3.4 Décodeur de lignes :

L'autre bloc du capteur CMOS est le décodeur de lignes, il sert à sélectionner une ligne de la matrice pour que sa lecture soit effectuée. Nous avons utilisé pour notre capteur une simple architecture pour le décodeur comme la Figure 3.7 le montre.

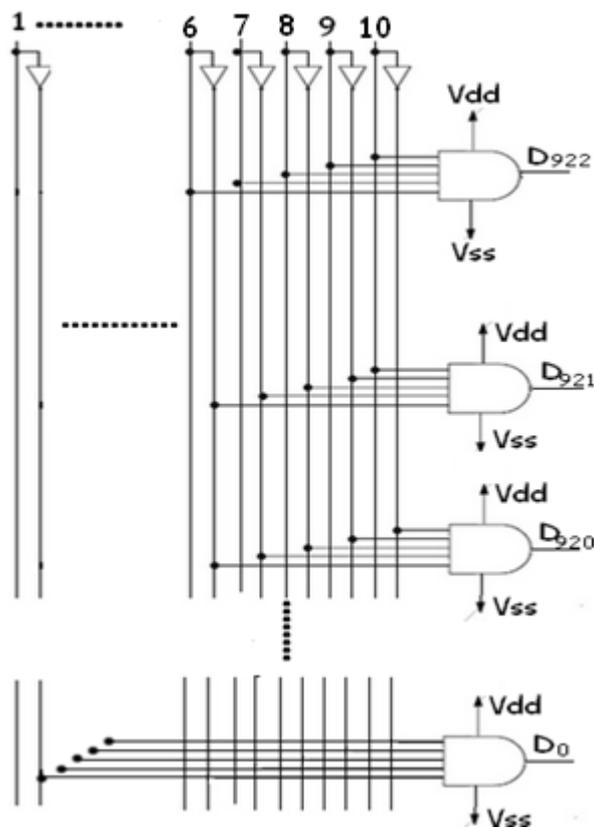


Figure 3.7 : décodeur de lignes

Une combinaison particulière des entrées sélectionne une seule cellule dans le décodeur, autrement dit, la sortie de cette cellule est réglée à niveau logique haut. Toutes les autres cellules sont non sélectionnées ou logique bas.

### 3.3.5 Mémoire tampon

La mémoire tampon sert à emmagasiner provisoirement les valeurs de sortie des convertisseurs analogique numérique jusqu'à ce qu'elles soient transférées vers l'extérieur. Chaque colonne de la matrice APS possède un octet qui lui est associé dans la mémoire tampon. Un total de 923 octets est donc accessible. Le mode de transfert des données en entrée et en sortie est présenté à la Figure 3.8. Les bits de chaque mot sont entrés de manière sérielle par les convertisseurs analogique numérique, verticalement. Ensuite, toutes les valeurs emmagasinées ainsi dans le tampon doivent être transférées vers le bus externe de données. Les octets sont transférés en série, mais leurs bits sont transférés en parallèle.

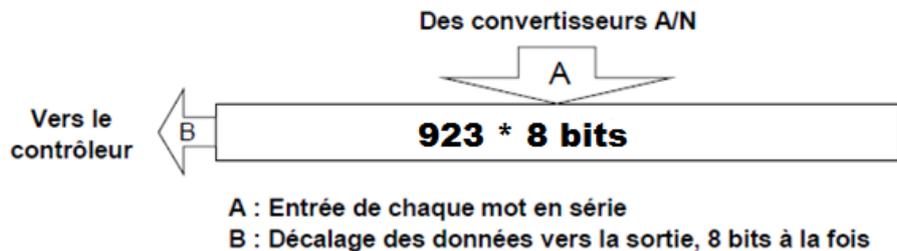


Figure 3.8 : Transfert des données dans la mémoire tampon

La Figure 3.9 présente l'agencement de ces cellules et leurs signaux de contrôle formant la mémoire tampon. La sortie du CAN est présentée à l'entrée des quatre espaces mémoire à la fois. Néanmoins, le démultiplexage est exécuté simplement en actionnant les signaux appropriés (Ph\_1\_vert\_in\_x) lors du chargement de la mémoire tampon.

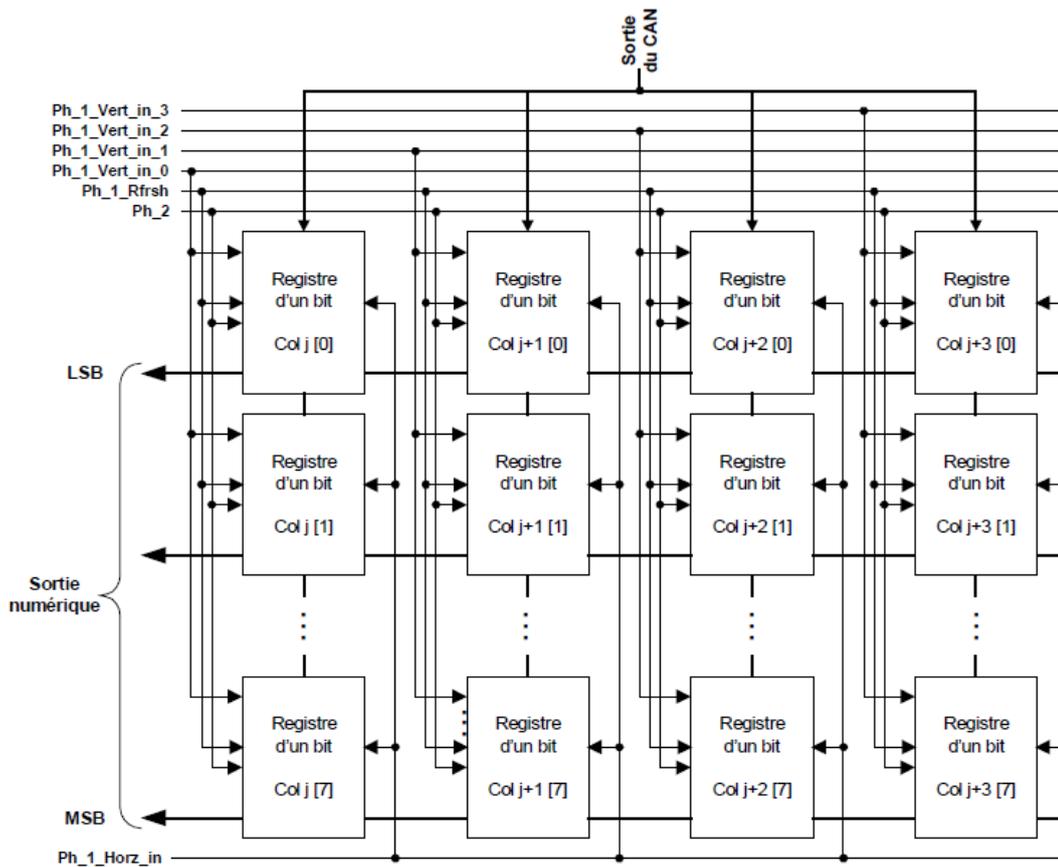


Figure 3.9 : Structure de la mémoire tampon

### 3.4 Paramètres du capteur :

#### 3.4.1 Taille du capteur :

La première contrainte est de définir la taille nécessaire du capteur selon le besoin de notre projet c'est-à-dire elle doit être suffisamment grande pour prendre une image complète de la pupille et suffisamment petite pour que le capteur soit intégré dans le système globale qui est sous forme de lunette, pour le calcul nous avons fait appel aux lois d'optique puisque le capteur sera précédé par une lentille mince convergente qui réfléchit la lumière incidente sur le capteur.

### 3.4.2 Mode d'acquisition séquentiel :

La seconde contrainte concerne le mode de fonctionnement séquentiel du capteur, qui doit naturellement être aussi simple que possible. On choisit donc un mode d'acquisition nommé « rolling readout ». Assumant une matrice ayant  $N$  rangées et  $M$  colonnes et dont la sélection des rangées se fait avec l'indice  $n = [1, N]$  et la sélection des colonnes se fait avec l'indice  $m = [1, M]$ , les étapes séquentielles de l'acquisition « rolling readout » sont les suivantes :

- 1) Intégration simultanée du courant de sortie des  $M$  photo détecteurs d'une même rangée d'indice  $n$  ;
- 2) Échantillonnage des tensions de sortie des  $M$  pixels de cette rangée  $n$  dans un total de  $3M$  mémoires situées à chacune des colonnes ;
- 3) Lecture des colonnes se fait simultanément car on a un convertisseur pour chaque colonne ;
- 4) Répétition des étapes 1), 2) et 3) pour les prochaines rangées de pixels jusqu'à la rangée  $N$ .

### 3.4.3 Temps d'acquisition :

L'intégration de la rangée d'indice  $n+1$  peut s'effectuer en même temps que la lecture des données de la rangée d'indice  $n$ , ce qui contribue à réduire le temps d'acquisition total. A cet effet, mentionnons qu'aucune durée spécifique n'est imposée pour l'acquisition d'une image.

On sait toutefois que le temps d'intégration doit être de l'ordre de quelques microsecondes afin de respecter les valeurs typiques rencontrées dans les capteurs d'images CMOS actuels, ces valeurs sont normalisées à 256, 512 et 1024 microsecondes.

### **3.5 Fabrication des microlentilles :**

Pour augmenter le taux de remplissage, des microlentilles peuvent être ajoutées pour chaque pixel, pour cela nous présentons un PDMS microlentilles avec différentes courbures fabriquées en utilisant un procédé de moulage à base d'eau. Il existe différentes techniques de fabrication de ces microlentilles et nous nous intéressons dans ce mémoire à une technique basée sur la technologie de moulage en élastomère car elle atteint des courbures parfaites en plus la focale dans cette technique est réglable contrairement aux autres techniques de fabrication [10].

#### **Étapes de fabrication :**

Avec cette méthode envisagée, non seulement la longueur focale de la microlentille, mais également son type, par exemple concave et convexe, peuvent être facilement changées par simple réglage de la pression d'air appliquée au cours du processus de moulage.

- 1- Utilisant un procédé de photolithographie standard, une couche de SU-8 est déposée sur le substrat Fig. 3.10 (1(a)).
- 2- Cette couche est utilisée en tant que moule principal pour l'étape ultérieure de moulage de PDMS comme indiqué dans la Fig. 3.10 (1 (b)) au cours de laquelle le PDMS prépolymère est directement coulé sur le moule et ensuite décollé après durcissement complet à 60° pendant 2 h.
- 3- Ce substrat de PDMS est ensuite lié à une membrane de PDMS de 80  $\mu\text{m}$  d'épaisseur en utilisant un procédé d'activation par plasma d'oxygène Fig. 3.10 (1(c)).
- 4- Ensuite une pression est appliquée sur la membrane pour obtenir le moule secondaire, le type de lentille (convexe ou concave) est obtenue en jouons sur la pression appliquée Fig. 3.10 (1(d), 2(d)).
- 5- La lentille désirée est obtenue par un dépôt de couche de PDMS sur le moule secondaire Fig. 3.10 (1(e), 2(e)).

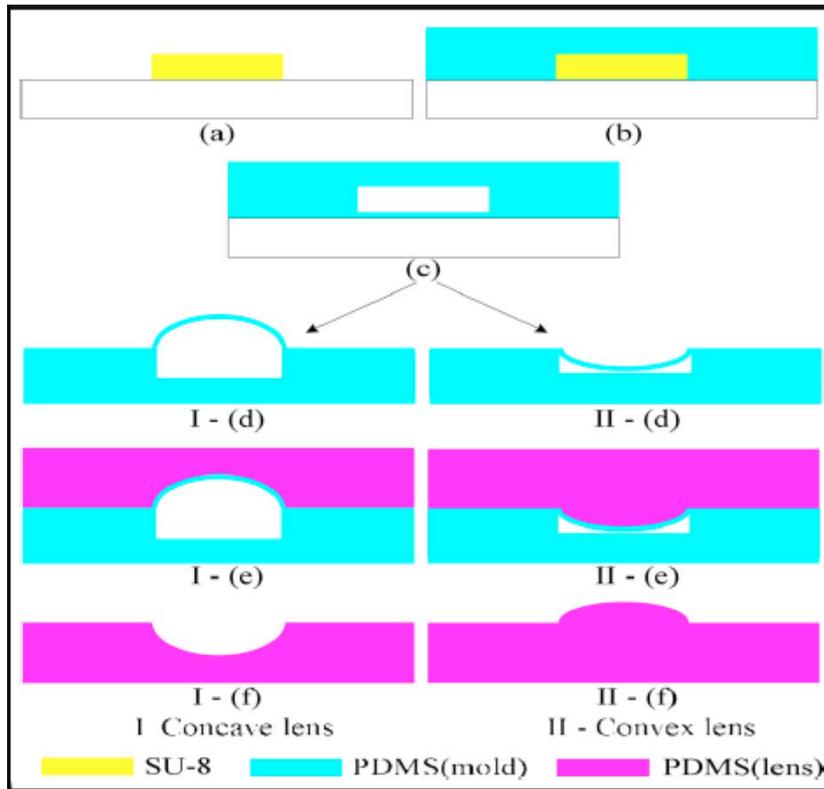


Figure 3.10 : Déroulement du processus de fabrication de microlentilles [10]

### 3.6 Simulation sous MATLAB :

Matlab est un logiciel développé par MathWorks et dédié au calcul numérique, ainsi qu'aux problèmes de commande. Matlab dispose d'un langage de programmation basé essentiellement sur le calcul matriciel, avec des fonctionnalités mathématiques et graphiques étendues.

Le synoptique ci-dessous représente les différentes étapes du programme depuis l'entrée qui est la longueur d'onde  $\lambda$  en arrivant à la sortie du pixel.

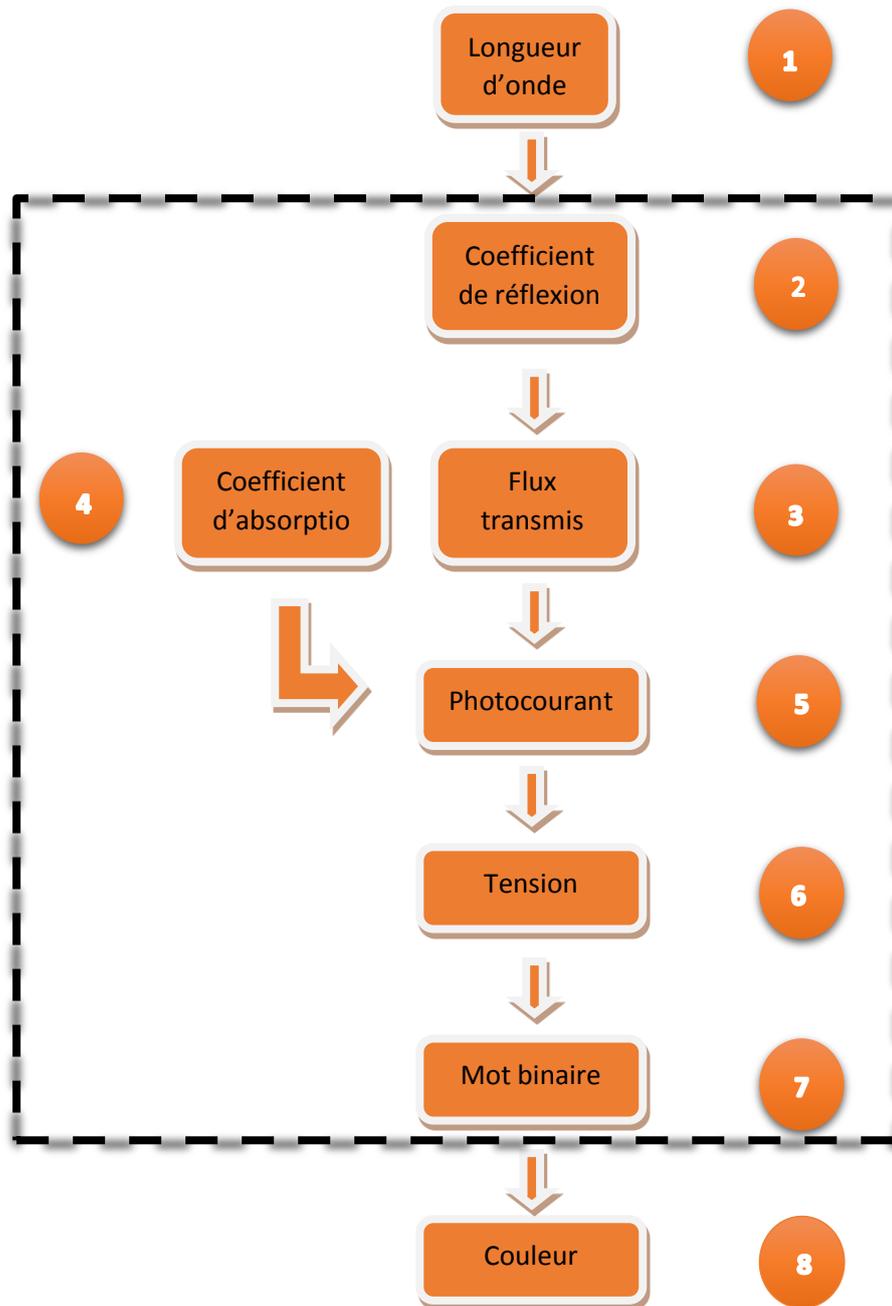


Figure 3.11 : Schéma synoptique du déroulement du programme

1 : L'entrée principale varie de 400nm à 800nm.

2 : Sous-programme qui calcul le coefficient de réfraction

3 : Sous-programme qui calcul le flux transmis au semi-conducteur

4 : Sous-programme qui calcul le coefficient d'absorption

5 : Sous-programme qui calcul le photocourant

6 : Sous-programme qui calcul la tension de sortie du pixel

7 : Sous-programme qui effectue la conversion de la tension de sortie en mots binaires

8 : Résultat de la simulation

Nous avons implémenté sous Matlab les différents paramètres nécessaires à la simulation du capteur.

### 1. Calcul de la réflectance :

Nous avons implémenté l'équation de la réflectance (avec une épaisseur d'oxyde de  $0.1\mu\text{m}$ ) pour le calcul et ce tout au long du spectre du visible comme le montre la Figure 3.12

```
1 - close all;
2 - clear all;
3 - clc;
4 - nair=1;
5 - nsio2=1.53022;
6 - nsi=3.49713;
7 - tox=0.1e-6;
8 - p=nsio2*tox;
9 - Lambda_indice = 400e-9 : 5e-9 : 800e-9;
10 - r = zeros(length(Lambda_indice));
11 - indice = 1;
12 - for Lambda=400e-9 : 5e-9 : 800e-9;
13 -     A = nsio2^2 * (nair-nsi)^2 * (cos((2*pi*p)/Lambda)^2);
14 -     B = (nair*nsi-nsio2^2)^2 * (sin((2*p*pi)/Lambda)^2);
15 -     C = nsio2^2 * (nair+nsi)^2 * (cos((2*pi*p)/Lambda)^2);
16 -     D = (nair*nsi+nsio2^2)^2 * (sin((2*p*pi)/Lambda)^2);
17 -     r(indice)=(A+B)/(C+D);
18 -     indice = indice + 1;
19 - end
20 - plot(Lambda_indice, r);
21
```

Figure 3.12 : Programme de calcul de la réflectance

## 2. Calcul du coefficient d'absorption :

Nous avons implémenté l'équation du coefficient d'absorption tout au long du spectre du visible comme le montre la Figure 3.13

```
1 - Lambda=400e-9:10e-9:800e-9; % en nm
2 - c=3e8;
3 - h= 4.135e-15;
4 - E=h.*c./Lambda;
5 - C = [5030.02, 483.916;1634.30,79.4079]; % en cm-1
6 - C3= 1046.08; % en cm-1
7 - Ek = 1.09969; % en eV
8 - E3 = 1.40985; % en eV
9 - dE = [0.0583148,0.0220161]; % en eV
10 - N = 0.394122;
11 - dN = 1.23084; % en eV-1.
12
13 - for w = 1:2
14 -     for j=1:2
15 -         Alpha= C(j,w)* power(E-Ek+power(-1,j)*dE(w)+abs(E-Ek+power(-1,j)*dE(w))/2,2) ./E;
16 -     end
17 - end
18
19 - Alpha=Alpha+C3*power((E-E3)+abs((E-E3)),N+dN*E) ./E;
20 - plot(Lambda,Alpha);
```

Figure 3.13 : Programme de calcul du coefficient d'absorption

## 3. Calcul du photocourant :

Nous avons implémenté l'équation du photocourant tout au long du spectre du visible comme le montre la Figure 3.14

```

1 - clear all;
2 - clc;
3
4 - e=1.6*10^-19;
5 - T=256*10^-6;
6 - Vdd=3.3;
7 - Cox=4.5*10^-3;
8 - Wt=0.7*10^-6;
9 - L=0.18*10^-6;
10 - Vtn1=0.465;
11 - Vtn2=0.465;
12 - mu=403.5;
13 - a=10^7;
14 - Wd=17*10^-6;
15 - Lp=35*10^-3;
16 - R=0.3;
17 - Phi0=1;
18 - Csn=10^-13;
19 - K=0.5*mu*Cox*(Wt/L);
20 - Vgs=0.465;
21
22 %calcul de la tension de reset
23 - Ib=K*((Vgs-Vtn2)^2);
24 - Vor = Vdd+sqrt(Ib/K);
25 %calcul du photocourant
26 - Phi=(1-R)*Phi0;
27 - Iph=e*Phi*(1-(1/(1+(a*Lp)))*exp(-a*Wd));
28 %calcul de Vout
29 - Vph=(1/Csn)*Iph*T;
30 - Vop = Vdd-Vph+sqrt(Ib/K);
31 - Vout=Vor-Vop;

```

Figure 3.14 : Programme de calcul du photocourant

#### 4. Convertisseur analogique numérique :

Nous avons également fait un programme d'un convertisseur analogique numérique d'une résolution de 8 bits comme le montre la Figure 3.15

```

1 - clear all;
2 - clc;
3
4
5
6 - Vc=5.68e-6;
7 - Vin = 0.5037e-3;
8 - N = 0;
9 - for i=1:2:550
10 -     i
11 -     if Vin >= i*Vc
12 -         if N == 256
13 -             break;
14 -         else
15 -             N= N + 1;
16 -         end
17 -     else
18 -         break;
19 -     end
20 -     Test = sprintf('la valeur de i*(q/2) = %f', i*Vc)
21 -     N
22 - end

```

Figure 3.15 : Programme du convertisseur analogique numérique

### 3.7 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons exposé les résultats de l'étude effectuée afin de réaliser un capteur d'image adéquat pour prendre une image de l'œil. La technologie utilisée, l'architecture du capteur et les différents blocs ont été passés en revue.

Le dimensionnement était calculé en prenant en considération les lentilles extérieures qui ont un rôle très important pour la réflexion de la lumière sur la matrice photosensible, sans eux nous obtiendrions une image floue et incompréhensible. Un autre facteur important est intervenu dans le calcul de la distance de travail qui correspond à la distance entre l'œil et le capteur, nous avons choisi de prendre une distance qui répond aux conditions imposées, elle ne doit être ni trop grande pour pouvoir intégrer le capteur dans des lunettes porteuses du système au complet (photo coagulation au laser et capteur), ni trop petite pour pouvoir prendre une photo correcte et pouvoir établir entre les deux, des lentilles.

L'architecture générale est celle d'un capteur d'image CMOS classique de type APS 3T avec un convertisseur analogique numérique pour chaque colonne afin d'augmenter la vitesse de lecture, un décodeur de ligne et une mémoire emmagasinant provisoirement les valeurs de sortie des convertisseurs analogique numérique jusqu'à ce qu'elles soient transférées vers l'extérieur. Chaque colonne de la matrice APS possède un octet qui lui est associé dans la mémoire tampon.

# **Chapitre IV**

## **Simulation et résultats**

## Chapitre 4 Simulation et résultats

---

### 4.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous avons illustré les résultats de la simulation effectuée par MATLAB d'une matrice de  $M \times N$  pixels en passant par la simulation des différents blocs du programme tel que le calcul de la réflectance, le coefficient d'absorption, et le photocourant. Cette simulation nous a permis d'effectuer une comparaison avec la littérature [1] [11] [12]. Une autre méthode de simulation qui donne un résultat plus précis aurait été souhaitable, elle consiste à faire entrer une image sur MATLAB pour ensuite lire l'intensité de chaque pixel avec le programme établi et afficher l'image comme sortie mais nous n'avons pas pu aboutir à notre objectif par cette méthode, puisque il nous faut un flux comme entrée ce qui n'est pas possible avec MATLAB. Cadence a pensé à créer un toolbox dédié à cette fonction mais ce dernier n'est pas à notre disposition [13].

### 4.2.1 Coefficient de réflexion :

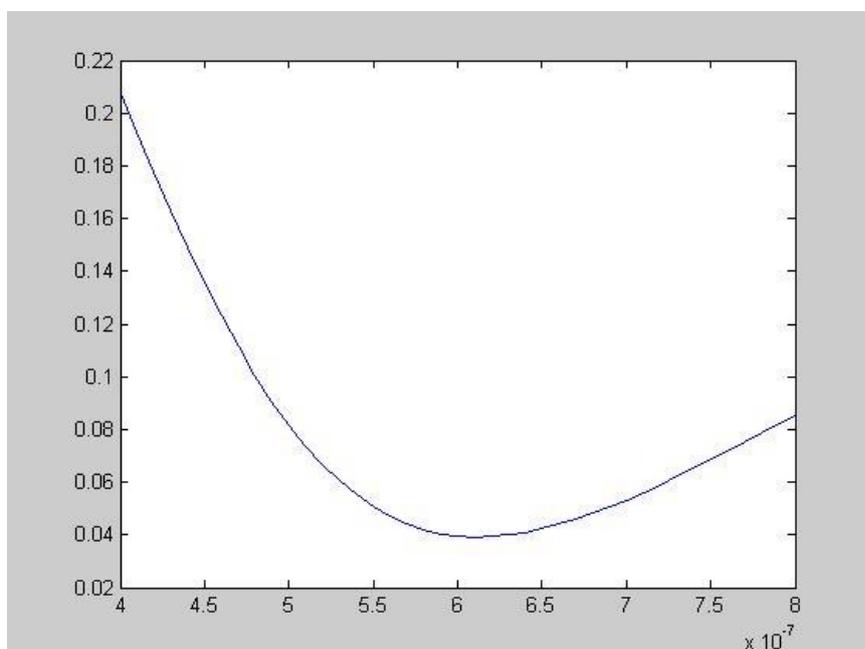


Figure 4.1 : Simulation de coefficient de réflexion

La figure 4.1 représente l'allure de coefficient de réflexion en fonction de la longueur d'onde. On constate que la réflexion des photons incidents diminue lorsque la longueur d'onde augmente jusqu'à la couleur verte, puis elle augmente un petit peu du vert au rouge.

#### 4.2.2 Coefficient d'absorption :

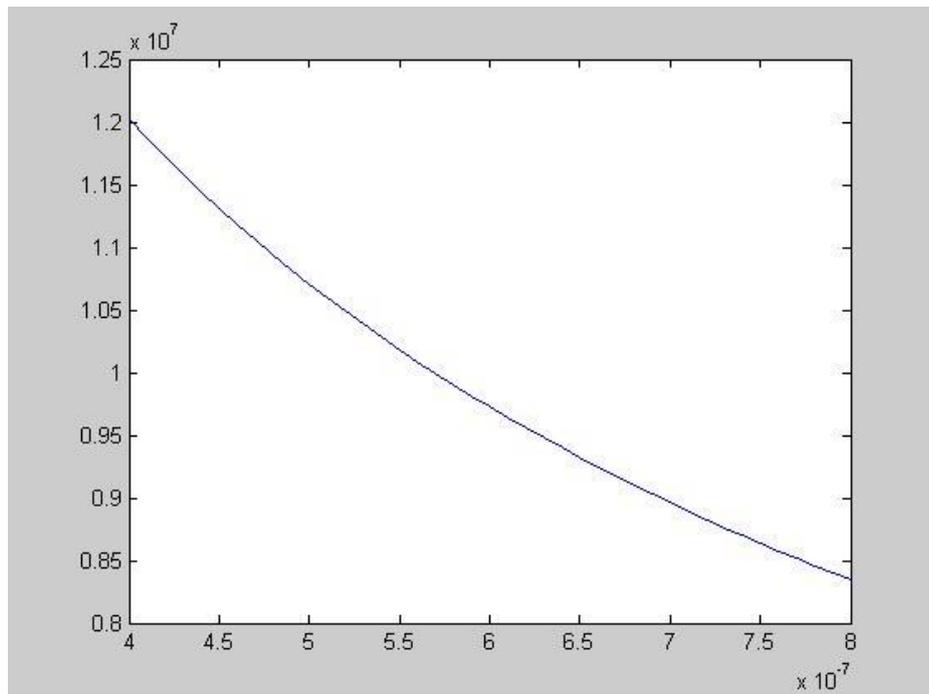


Figure 4.2 : Simulation de coefficient d'absorption

La figure 4.2 montre le coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde. On constate que le coefficient d'absorption diminue avec l'augmentation de la longueur d'onde ce qui traduit la réalité du phénomène car plus l'énergie des photons est petite plus leur absorption est réduite.

En effet, lorsque la lumière incidente est faible, le coefficient d'absorption est très élevé et tous les photons sont absorbés en surface. A l'inverse, lorsque la longueur d'onde est grande, le coefficient d'absorption est moins élevé.

### 4.2.3 Courant photonique :

La figure 4.3 représente le courant photonique en fonction de la longueur d'onde. On constate que le photocourant diminue si la longueur d'onde augmente car les photons ayant une énergie proche de celle de la bande interdite génèrent moins des paires électron-trou.

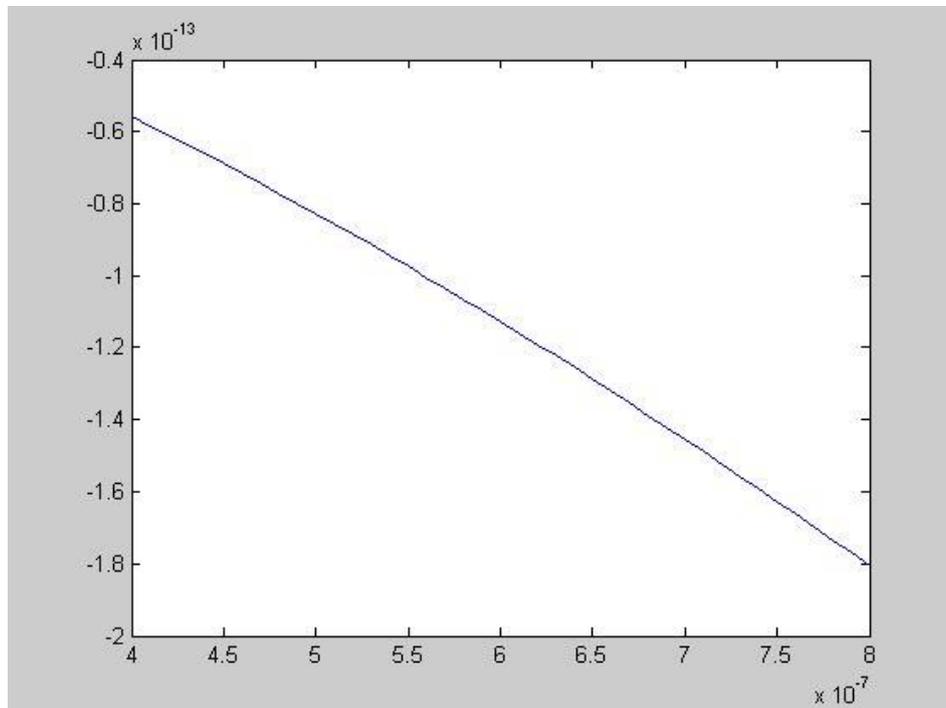


Figure 4.3 : Simulation de photocourant

### 4.3 Tension de sortie :

La figure 4.4 illustre la variation de la tension de sortie en fonction de  $\lambda$ , on réalise que la tension est décroissante tout au long du spectre visible, ça revient au fait que le photocourant est décroissant donc automatiquement  $V_{out}$  le suit.

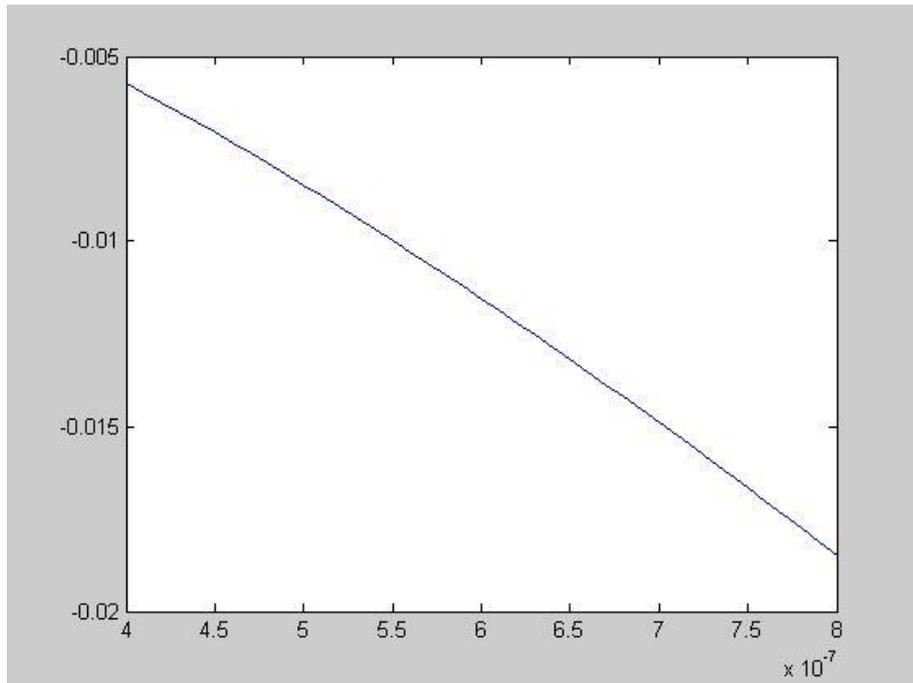


Figure 4.4 : Simulation de la tension de sortie en fonction de lambda

La figure ci-dessous représente la variation de la tension de sortie en fonction de I<sub>ph</sub>, la courbe est linéaire et c'est justifié par l'équation de V<sub>out</sub> qui vérifie la linéarité.

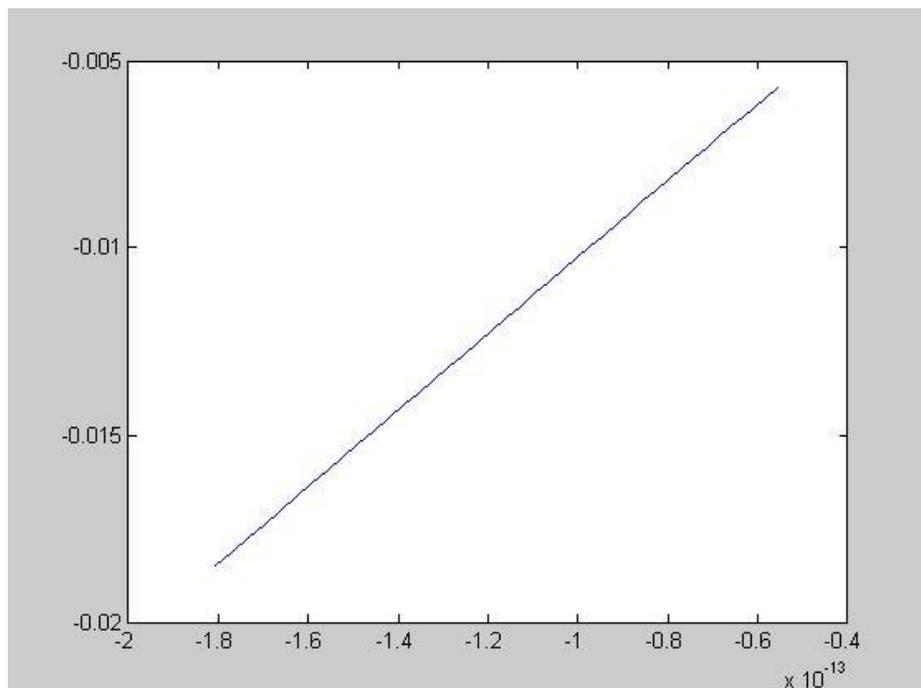


Figure 4.5 : Simulation de la tension de sortie en fonction de I<sub>ph</sub>

## 4.4 Codage des couleurs :

Nous avons simulé une matrice de 16\*16 pixels, les longueurs d'onde attribuées aux pixels sont différentes l'une des autres.

Après l'exécution nous avons obtenu les résultats suivant :

- Pour  $\lambda = 400\text{nm}$

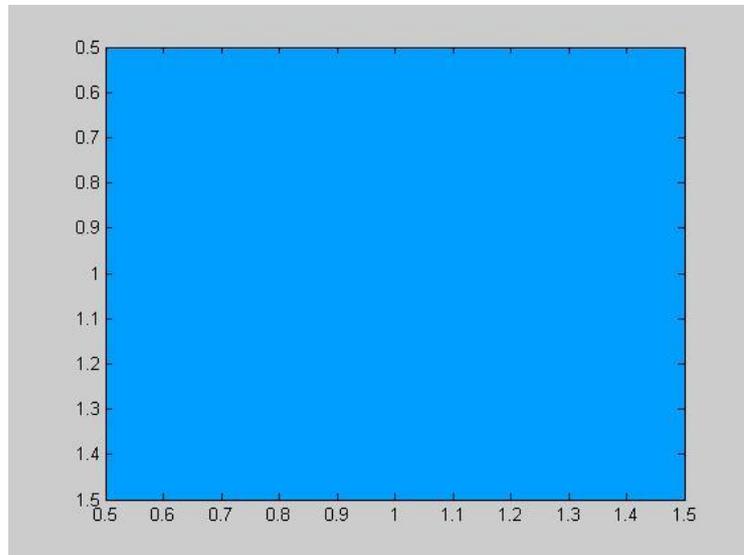


Figure 4.6 : couleur obtenu pour  $\lambda = 400\text{nm}$

- Pour  $\lambda = 800\text{nm}$

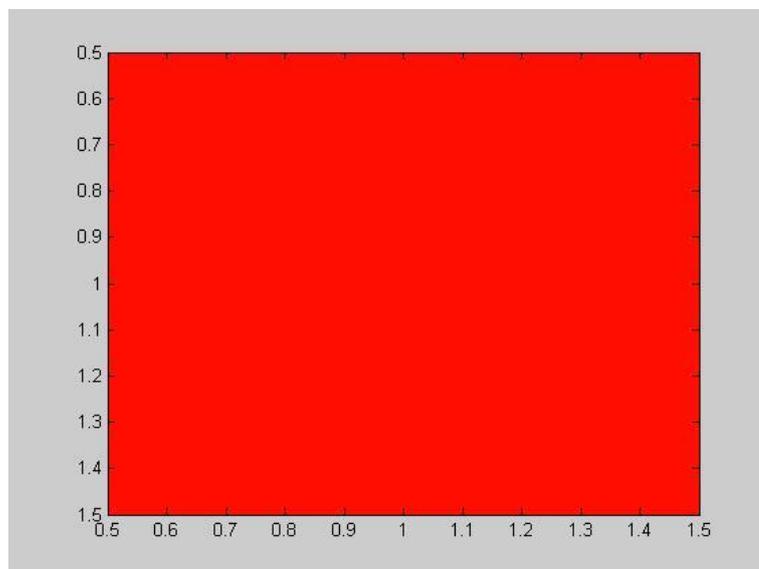


Figure 4.7 couleur obtenu pour  $\lambda = 800\text{nm}$

- pour  $\lambda = 580$

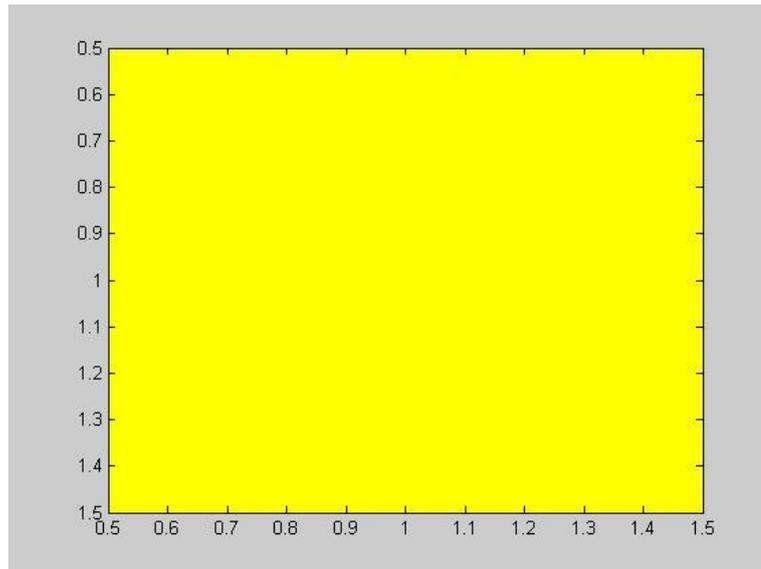


Figure 4.8 couleur obtenu pour  $\lambda = 580\text{nm}$

On remarque que les couleurs obtenus sont proches aux longueurs d'ondes de l'entrée, et cela est dû aux bruits et au rendement de la photodiode.

#### **4.5 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons pu illustrer les différentes courbes obtenues par la simulation de même nous avons pu confirmer la justesse du raisonnement discuté et des équations établies. Avec ces interprétations les paramètres du capteur sont plus clairs et plus compréhensibles.

# **Conclusion générale et perspectives**

## Conclusion générale

---

L'extinction des médias analogiques au profit des supports numériques est désormais une prémisses acquise qui, lorsque couplée à la miniaturisation des produits électroniques, engendre un besoin grandissant au niveau des interfaces de conversion entre l'univers analogique et le monde numérique. Cette observation est d'autant plus véridique en ce qui concerne les capteurs d'image, auxquels est dévouée une importante partie de la recherche en microélectronique. Les travaux de recherche actuels visent plus spécifiquement à satisfaire la demande croissante pour les capteurs d'images miniatures, légers, peu énergivores et performants. Les champs d'application de tels capteurs sont vastes et s'étendent des appareils-photo numériques haute-performance jusqu'aux caméras destinées à améliorer la vision dans les véhicules automobiles, en passant par les capteurs dédiés aux téléphones cellulaires, les systèmes de vision robotique et l'instrumentation médicale.

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons fait l'étude et le calcul de dimensionnement d'un capteur d'images afin de l'insérer dans un dispositif de traitement par photocoagulation au laser. Il aura pour rôle la capture de l'image de l'œil pour contrôler le positionnement du faisceau laser sur le point de la rétine.

Une simulation sous MATLAB a été réalisée et nous avons obtenu des résultats très raisonnables. Nous avons pu développer un programme ayant comme entrée une longueur d'onde et comme sortie la couleur qui lui correspond. Les couleurs obtenues ont un petit décalage sur la palette des couleurs et cela est dû principalement aux bruits, à la réflectance, et au taux d'absorption. Des améliorations peuvent être apportées mais cela nécessite des moyens n'étant pas à notre portée. Prenons exemple des logiciels et des paramètres électriques et technologiques des différents composants qui constituent le capteur. Nous avons pu surpasser les difficultés rencontrées durant notre projet afin d'obtenir des résultats acceptables.

# Bibliographie

---

- [1] David Navarro : Architecture et Conception de Rétines Silicium CMOS : Application à la mesure du flot optique, thèse, université Montpellier II, 2003.
- [2] <http://www.comment-photographier.com/la-vitesse-dobturation-ou-comment-maitriser-le-mouvement/#.UjSP6NLPTfA>
- [3] Hakim Zimouche : Capteur d'images CMOS à réponse insensible aux variations de température, thèse, université de Grenoble, 2011.
- [4] Jérôme Goy : Étude, conception et réalisation d'un capteur d'image APS en technologie standard CMOS pour des applications faible flux de type viseur d'étoiles, thèse, institut nationale polytechnique de Grenoble, 1992.
- [5] Jérôme Dubois : Conception en technologie CMOS d'un Système de Vision dédié à l'Imagerie Rapide et aux Traitements d'Images, thèse, Université De Bourgogne, 2008.
- [6] [pedagogie2.ac-reunion.fr/colBretagne/bouquin/capteurs.PDF](http://pedagogie2.ac-reunion.fr/colBretagne/bouquin/capteurs.PDF)
- [7] Christophe Chamot, Tristan Piolot : imagerie numérique en biologie, 2007.
- [8] Klaus Weber : Les capteurs CMOS : Prêts pour la diffusion ; aujourd'hui, Grass valley ,2012
- [9] Jonathan Coulombe : capteur d'images intégré en mode courant et à résolution variable, université de Montréal, 2000.
- [10] Hongbin Yu, Guangya Zhou, Fook Siong Chau, and Feiwen Lee : Fabrication and characterization of PDMS microlenses based on elastomeric molding technology, Optics Letters, Vol.34, 21, 2009.
- [11] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junction/absorption-coefficient>

[12] Rellam Wahid : Modélisation d'un photocapteur BTJ, mémoire, Université de Saad Dahlab, 2013.

[13] David Navarro, Zhenfu Feng, Vijayaragavan Viswanathan, Laurent Carrel, Ian O'Connor : Image toolbox for cmos image sensors simulations in Cadence ADE, Université de Lyon.