

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEINEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BATNA
FACULTE DE TECHNOLOGIE

MEMOIRE

Présenté au

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER EN ELECTRONIQUE

**Option: Technologie des composants semi-conducteurs
et dispositifs photovoltaïques**

Par

Abdelmalek KADRI

Ingénieur d'état en Electronique

intitulé

Etude et modélisation du capteur optique BTJ

Devant le jury :

Dr. BENHAYA Abdelhamid	<i>Professeur</i>	<i>Univ. Batna</i>	<i>Président</i>
Dr. DJEFFAL Fayçal	<i>M. C. A</i>	<i>Univ. Batna</i>	<i>Rapporteur</i>
Dr. BOURIDAH Hachemi	<i>M. C. A</i>	<i>Univ. Jijel</i>	<i>Examineur</i>
Dr. DIBI Zohir	<i>Professeur</i>	<i>Univ. Batna</i>	<i>Examineur</i>
Dr. MAHAMDI Ramdane	<i>Professeur</i>	<i>Univ. Batna</i>	<i>Examineur</i>

Remerciements

Un grand merci à monsieur DJEFFAL Fayçal, maître de conférences à l'université de Batna, membre du Laboratoire de l'Electronique Avancée (LEA) et directeur de ce mémoire qui a encadré mes travaux. J'ai beaucoup profité de sa rigueur scientifique et de son sérieux. Son expérience dans le domaine de la microélectronique, particulièrement dans le domaine de la modélisation et la physique des composants m'a permis de m'investir avec détermination dans ce travail.

Je tiens à remercier très vivement monsieur BENHAYA Abdelhamid, professeur à l'université de Batna, d'avoir accepté de présider le Jury de ce mémoire.

Mes sincères remerciements les plus vifs à Mr MAHAMDI Ramdane, professeur à l'université de Batna, à Mr BOURIDAH Hachemi, maître de conférences à l'université de Jijel, et à Mr DIBI Zohir professeur à l'université de Batna, pour avoir accepté d'être les examinateurs de ce mémoire.

Mes remerciements ne seraient pas complets si je n'exprimais pas ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce travail, en particulier, tout le personnel du département d'électronique à l'université de Batna, pour leur bonne humeur et leur disponibilité.

Mes derniers remerciements vont à ma famille et mes amis, et surtout à tous les collègues du Laboratoire de l'Electronique Avancée qui m'ont tous entouré et m'ont donné la force de passer les moments difficiles.

Je dédie ce travail à :
l'âme de mon père,
Ma chère mère,
Mes frères,
Mes sœurs,
Toute ma famille et tous mes collègues.

TABLE DES MATIERES

Tables des Matières

Introduction générale	I
Chapitre I : Lumière et capteurs optiques	
I.1 Théories et propriétés fondamentales de la lumière	1
I.1.1 Photométrie et radiométrie	2
I.1.1.1 La radiométrie	2
I.1.1.2 La photométrie	2
I.1.2 Le spectre lumineux	2
I.2 Historiques et technologiques de la prise de l'image	4
I.2.1 Généralités	4
I.2.2 Historique	5
I.2.3 Principe technologique	6
I.2.4 Principaux semi-conducteurs utilisés en optoélectronique	7
I.3 Généralités sur les capteurs optiques	8
I.3.1 Classes d'effets des capteurs optiques	8
I.3.2 Capteurs optiques pour longueur d'onde voisine Infrarouge et ultra-violet	8
I.3.3 Caractéristiques métrologiques d'intérêt	8
I.3.4 Les différentes typologies des capteurs optiques	9
I.4 Principaux capteurs optiques	10
I.4.1 Photodiode PIN	10
I.4.2 Photodiode à avalanche	11
I.4.3 Phototransistor	11
I.4.4 Capteur CCD et CMOS	11
I.4.5 Le capteur CMOS BDJ	16
I.4.6 Le capteur CMOS BTJ	17
I.5 Conclusion	19

Chapitre II: Structure et fonctionnement du capteur BDJ

II.1 Architecture du capteur d'image CMOS	20
II.2 Structure du photo-détecteur BDJ	21
II.3 Coefficient de réflexion	23
II.4 Taux de génération de paires électron-trou	24
II.5 Photo-courant	29
II.5.1 Courant de conduction	31
II.5.2 Courant de diffusion	32
II.6 Courant d'obscurité (de fuite)	34
II.7 Structure du photo-détecteur BTJ	35
II.7.1 La conception de puce et de mesure	36
II.7.2 Réponse spectrale	37
II.7.3 Caractérisation colorimétrique	39
II.8 Conclusion	40

Chapitre III: Notions fondamentales sur le Bond Graph

III.1 Historique	41
III.2 Introduction au Bond Graph	41
III.3 Intérêts du Bond Graph	42
III.4 Outils de simulation	43
III.5 Notions fondamentales	44
III.5.1 Variables de puissance	44
III.5.2 Variables d'énergie.....	44
III.6 Les éléments de base de bond graph	48
III.6.1 Éléments actifs	48
III.6.2 Éléments passifs.....	48
III.6.3 Éléments de jonction	51
III.6.4 Éléments détecteurs.....	51
III.6.5 Procédure de construction du BG.....	51
III.7 Causalité	54
III.7.1 Notion de causalité	54

III.7.2 La procédure d'affectation de la causalité.....	54
III.7.3 Règles d'affectation de la causalité	55
III.7.4 Contrainte de causalité.....	55
III.8 Conclusion	57

Chapitre IV: Modélisation comportementale du capteur BTJ en utilisant le Bond Graph

IV.1 Introduction	58
IV.2 Modélisation analytique du capteur optique BDJ	58
IV.3 Modélisation avec Bond Graph du capteur optique BDJ	63
IV.3 Modélisation avec Bond Graph du capteur optique BTJ	73
IV.4 Conclusion	78

Conclusion générale	79
----------------------------------	-----------

Bibliographie	81
----------------------------	-----------

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le capteur de couleur permet, comme tout détecteur optique, de convertir le signal optique en un signal électrique. Les concepteurs du détecteur de couleurs tendent à concevoir des systèmes à faible coût, faible consommation et de plus en plus compacte en intégrant la circuiterie.

La capture d'image était sur des films argentiques, après les développements des recherches sur les semi-conducteurs la capture d'image s'oriente vers l'utilisation des capteurs CCD (Charge Coupled Device) et des capteurs CMOS. Les premiers CCD ont été inventés en 1969, ils ont été très utilisés dans le domaine de détection de couleurs durant des décennies; le développement de la technologie des CMOS, vers les années 90, a permis aux capteurs CMOS de concurrencer les capteurs CCD vu ses caractéristiques:

- o possibilité de miniaturisation,
- o faible consommation,
- o faible coût

Mais des inconvénients sont aussi présents dans le CMOS l'empêchant d'être le seul composant utilisé pour l'imagerie.

La conception de la première structure PD BTJ (Photo Diode Buried Triple Junction « Photodiode à Triple Junction Enterrée »), implémentée dans le processus CMOS standard, a été présentée en 1996 par Guo-Neng LU [1]; cette structure permet l'identification de couleur monochromatique. L'utilisation de cette structure permet une description de la dépendance des courants I_1 et I_2 en fonction de la longueur d'onde et par conséquent la longueur d'onde de la lumière incidente peut être identifiée en utilisant le rapport I_1/I_2 . La technique de détection de couleur, dans la jonction enterrée, est basée sur la dépendance de la profondeur d'absorption du silicium avec la longueur d'onde de la lumière incidente [2]. La détection de couleur par le biais du capteur BTJ a plusieurs applications, parmi lesquelles: capture image, automatisation industrielle, analyses biomédicale, démodulation optique et de nombreuses applications qui

nécessitent l'intégration des dispositifs de détection dans les systèmes VLSI (Very-Large-Scale Integration).

La modélisation est essentielle afin de pouvoir simuler le comportement des circuits intégrés avant de les élaborer au niveau des salles blanches. Donc, l'objectif principal de ce travail est de développer un modèle comportemental qui permet de décrire le comportement du capteur en fonction de ces paramètres géométriques et électriques afin de l'exploiter comme un bloc de détection dans une chaîne d'acquisition. Notre étude comportementale est basée sur modélisation par Bond Graph (BG). Cette dernière est une méthode graphique qui permet de traiter les chaînes d'énergie et d'information, elle s'applique aux systèmes linéaires, non linéaires, continus, échantillonnés, électroniques, hydrauliques, mécaniques ainsi qu'aux systèmes hybrides.

Une approche de la structure du capteur BTJ, avec un circuit électrique équivalent pour les petits signaux, a été proposée dans plusieurs références [1, 3, 4]; dans notre étude on a utilisé ce circuit dans le logiciel SYMBOLS-2000 (logiciel de simulation pour la modélisation Bond Graph). Ce logiciel nous permet d'effectuer la simulation des réponses en photo-courants générés, au niveau des jonctions enterrées de la structure BTJ, en fonction du flux lumineux appliqué (longueur d'onde). Il est à noter que l'utilisation du SYMBOLS-2000 nous permet la commande de la variation des paramètres du circuit équivalent et visualiser le comportement du composant en temps réel.

Les grandes lignes des quatre chapitres de ce mémoire sont présentées comme suit:

Le premier chapitre est consacré à un rappel sur des notions générales sur la lumière et les différents types des capteurs optiques, ainsi qu'une présentation des capteurs de couleurs CMOS BDJ (Buried Double Junction) et BTJ (Buried Triple Junction).

Le deuxième chapitre présente la structure et le fonctionnement du capteur BDJ et BTJ. Cette structure à jonctions enterrées dans un semi-conducteur permet la détection de la couleur d'un flux lumineux monochromatique (identification de couleur).

Le troisième chapitre donne des notions générales sur le Bond Graph (BG) telles que les éléments de Bond Graph (source de flux, source d'effort, éléments de stockage ...) et la

causalité. Le Bond Graph est un outil de modélisation comportementale qui nous permet de traiter les chaînes d'énergie et d'information, il s'applique aux systèmes linéaires, non linéaires, continus, échantillonnés, électroniques, hydrauliques, mécaniques ainsi qu'aux systèmes hybrides.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude de la modélisation comportementale du capteur optique à jonctions enterrées en utilisant le Bond Graph. Nous avons utilisé le logiciel SYMBOLS-2000 pour la simulation du circuit électrique équivalent de ce capteur (SYMBOLS-2000 est un logiciel de simulation pour la modélisation Bond Graph); ce logiciel nous permet la détermination de la réponse spectrale des photo-courants, au niveau des jonctions enterrées, en fonction du flux lumineux appliqué.

Une conclusion générale et des perspectives d'amélioration parachèvent ce travail.

CHAPITRE I

LUMIERE ET CAPTEURS OPTIQUES

I.1 Théories et propriétés fondamentales de la lumière

La lumière est la portion visible du rayonnement électromagnétique qui couvre un domaine extrêmement large. Ces ondes électromagnétiques se déplacent dans le vide à la vitesse lumière: $c=299792 \text{ km/s}$. Elles diffèrent les unes des autres selon leurs longueurs d'onde et l'énergie qu'elles transportent. On sait que la lumière peut être considérée soit comme un phénomène ondulatoire, soit constituée de particules élémentaires de masse nulle, les photons. Pour le premier cas, on emploie la longueur d'onde pour caractériser les différents rayonnements visibles; celui ci s'étend de 380nm à 780nm. En dessous c'est l'ultra violet, au-dessus c'est l'infrarouge. Pour le second cas, les travaux de Planck et Einstein ont conduit à admettre que l'énergie transportée par la lumière est quantifiée. Chaque photon porte une énergie $E=h.\nu$ (voir équation I.1), et le comportement de la lumière a été décrit par Newton, puis par les équations de Maxwell, aujourd'hui par les lois de l'électrodynamique quantique [3].

L'équation d'énergie de photon [3]:

$$E = h . \nu \quad (\text{I.1})$$

Avec :

h : Constante de Planck

ν : Fréquence de l'onde des photons
incidents

$$\lambda = \frac{V}{\nu} \quad , \quad V = \frac{c}{n}$$

$$\text{Dans le vide : } \lambda = \frac{c}{\nu}$$

λ : Longueur d'onde

C : vitesse de la lumière = 299 792 Km/s

V : Vitesse

n : Indice de réfraction du milieu

Les deux caractères corpusculaire et ondulatoire sont mis en évidence dans la région visible du spectre électromagnétique.

Il existe trois théories qui permettent de décrire les phénomènes lumineux [5]:

- L'optique géométrique: le comportement de la lumière est modélisé par des rayons lumineux.

- L'électromagnétisme: la lumière est considérée comme une onde polychromatique, c'est-à-dire une superposition d'ondes monochromatiques de différentes longueurs d'onde.
- La mécanique quantique: La lumière est décrite comme composée de quanta d'énergie; des photons (particules élémentaires de lumière incidentes sur la surface du pixel).

Pour expliquer les phénomènes à l'origine de la réponse à la lumière des composés optoélectronique, on utilise la théorie de mécanique quantique, c'est-à-dire l'aspect corpusculaire de la lumière. Le but d'un capteur optique est de créer un signal électrique lié par une relation entre le nombre de ses charges et le nombre de photons.

I.1.1 Photométrie et radiométrie

Les techniques exploitées par les capteurs optiques sont [5]:

I.1.1.1 La radiométrie

C'est l'étude des rayonnements et de leurs propriétés à partir de critères énergétiques. Ces critères sont issus des propriétés énergétiques des ondes électromagnétiques et ce, sur la **totalité du spectre** disponible lors de l'émission ou de la réception en termes de longueurs d'ondes

I.1.1.2 La photométrie

C'est l'étude des rayonnements et de leurs propriétés à partir de critères énergétiques restreint sur la seule étendue du **spectre visible** conventionnellement restreint à l'intervalle allant de 400nm à 800nm (Figure I.1).

I.1.2 Le spectre lumineux

La lumière visible est la partie du spectre électromagnétique qui est visible pour l'œil humain. Il n'y a pas de limite exacte au spectre visible; l'œil humain adapté à la lumière possède généralement une sensibilité maximale à la lumière de longueur d'onde d'environ 550nm, ce qui correspond à une couleur jaune-verte (Figure I.2). Généralement, on considère

que la réponse de l'œil couvre les longueurs d'ondes de 380 nm à 780 nm bien qu'une gamme de 400 nm à 700 nm soit plus commune (Tableau I.1).

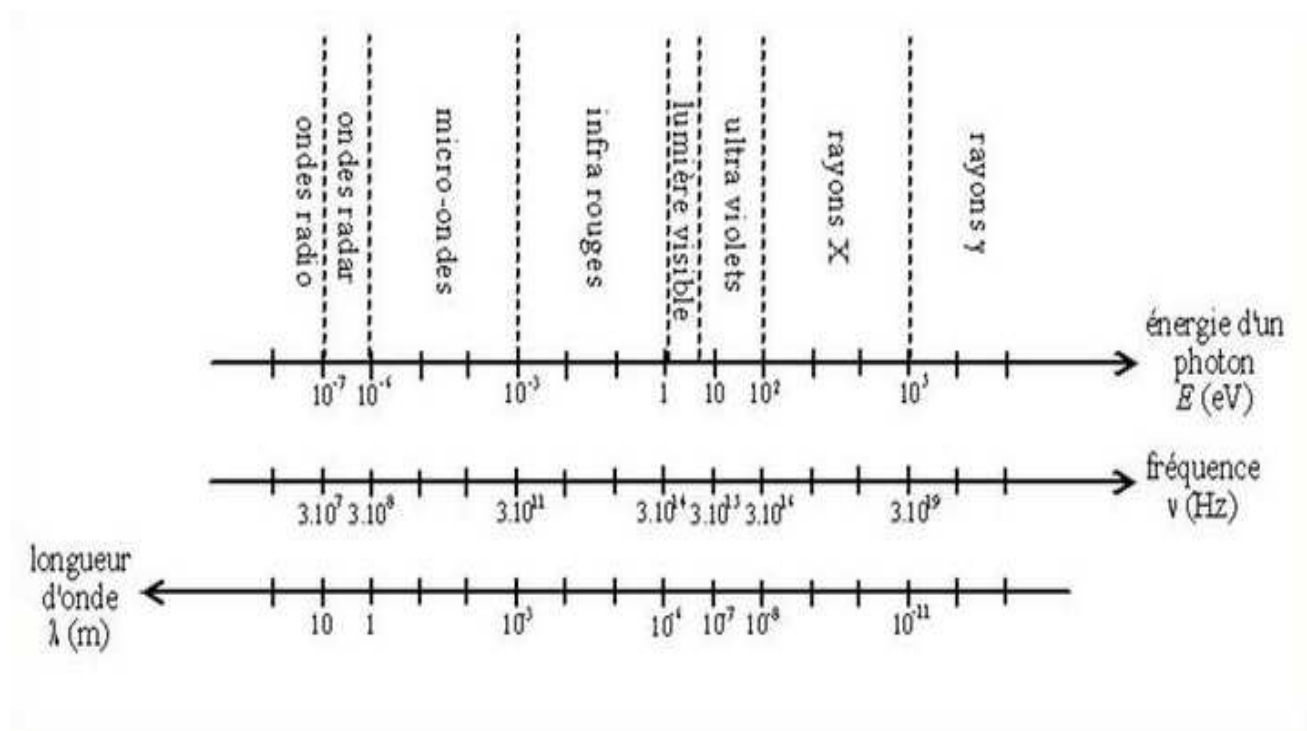


Figure I.1 Les échelles de fréquences et de longueurs d'ondes à radiométrie et photométrie

couleur	Longueur d'onde dans le vide (nm)	Fréquence (THz)	Énergie de photon (eV)
Infrarouge	> 780	< 405	< 1.6
rouge	~ 625-740	~ 480-405	~ 1.6 - 2.0
orange	~ 590-625	~ 510-480	~ 2.0 - 2.1
jaune	~ 565-590	~ 530-510	~ 2.1 - 2.2
vert	~ 520-565	~ 580-530	~ 2.2 - 2.4
bleu	~ 446-520	~ 690-580	~ 2.4 - 2.8
violet	~ 380-446	~ 790-690	~ 2.8 - 3.2
ultraviolet	< 380	> 790	> 3.3

Tableau I.1 Longueur d'onde, énergie de photon «couleur de lumière»

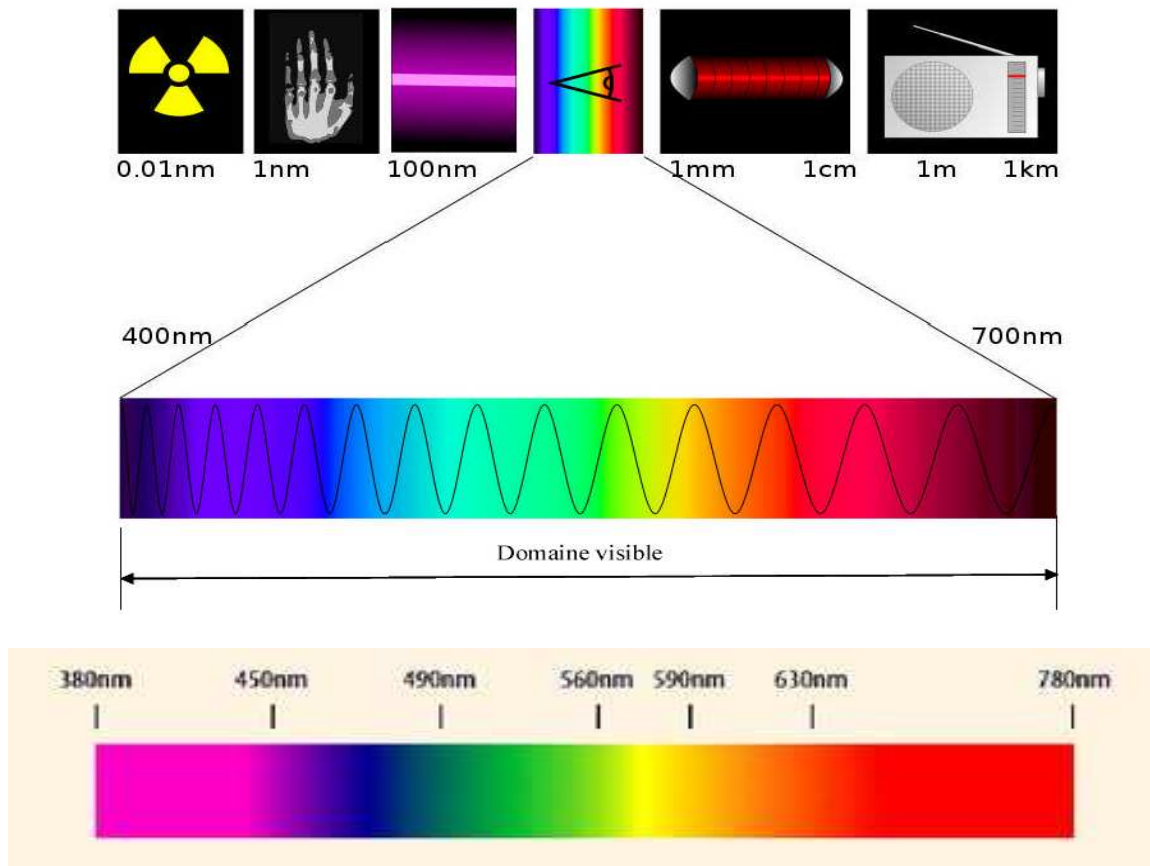


Figure I.2 Domaine visible

I.2 Historiques et technologiques de la prise de l'image

I.2.1 Généralités

Historiquement, on peut considérer que la pellicule argentique est l'ancêtre du capteur optique. En effet, elle permet de convertir le signal lumineux en fixant l'information transitant par les ondes lumineuses sur un support papier. Bien qu'actuellement «dépassée», cette technologie des appareils photographiques argentiques a permis de développer des méthodes techniques du traitement des signaux lumineux qui restent d'actualité avec les Appareils Photographiques Numériques (APN).

Le processus de prise de vue (figure I.3) d'un APN est fondamentalement le même que celui d'un appareil argentique.

La prise d'image se déroule en trois phases :

- La première phase consiste à filtrer le flux lumineux autour des longueurs d'ondes des couleurs élémentaires (Vert, Bleu, Rouge ou Jaune, Bleu, Rouge selon les cas).
- La seconde à capter le flux lumineux correspondant.
- La troisième et dernière étape est de coder cette information reçue en données numériques.

Ce principe fondamental est à la base de toute exploitation technique des capteurs optiques en temps que capteur d'image. Cependant, avec la miniaturisation des technologies, les techniques qui se sont développées bien que fidèle à ce principe se sont complexifiées et de fait, la conception des capteurs optiques est devenu un domaine pluridisciplinaire où interviennent de nombreux domaines comme la Photométrie, la Physique des Semi-conducteurs, l'Optique Ondulatoire, la Mécanique Ondulatoire [5].

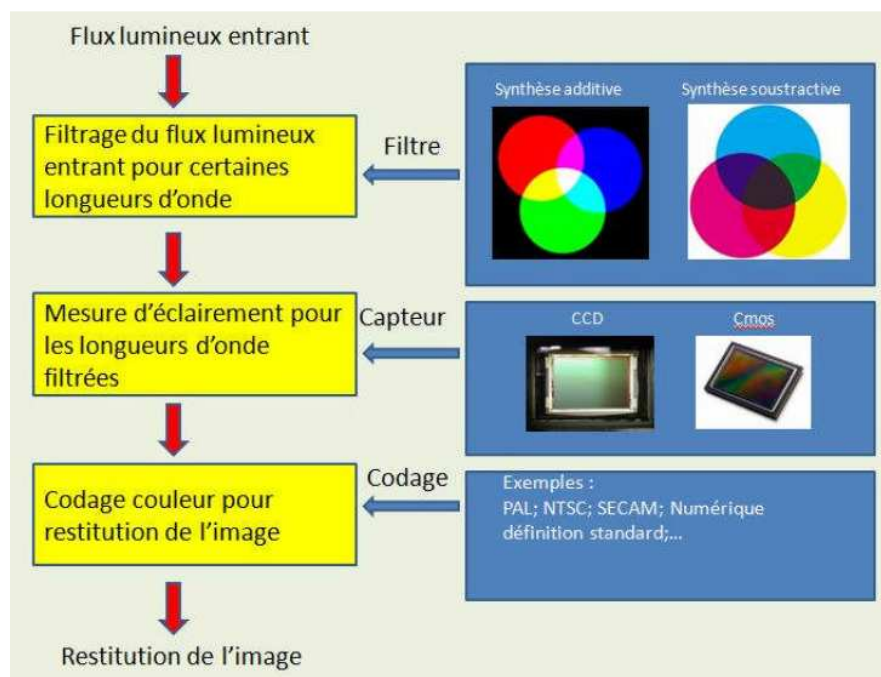


Figure I.3 Le processus de prise d'image par Appareil Photographique Numérique[5]

I.2.2 Historique

Au IV^e siècle avant J.C Aristote, le philosophe grec, découvre que la lumière entrant dans une pièce sombre par un petit trou, projette sur le mur d'en face l'image inversée des objets placés devant l'orifice. Ce principe prend le nom de «camera *obscura*».

1515 : Léonard de Vinci reprend et décrit le principe de la caméra *obscura* pour en faire un modèle réduit. Ce modèle correspond à une boîte fermée appelée chambre noire. La lumière entre par un petit trou, le sténopé, et les rayons lumineux dessinent sur un des côtés l'image inversée face au petit trou. Cette transformation de la chambre d'Aristote en un appareil portatif est souvent assimilée au début de l'appareil photo (bien qu'ici le procédé soit sans pellicule).

1924 : Premier "Leica", appareil photographique argentique portable

1948 : le transistor est créé par la firme Bell Labs (grâce aux ingénieurs John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley).

1969 : George Smith et Willard Boyle inventent le premier capteur CCD (Charge Coupled Devices) chez Bell Labs. Un CCD est une mémoire électronique qui peut être chargée par la lumière et peut contenir une charge variable correspondant à la teinte et l'intensité de la lumière, ce qui les rend utiles comme les appareils d'imagerie pour les caméras, des scanners et des télécopieurs.

1970 : une nouvelle technologie dite M.O.S. (Metal Oxide Semiconductor) permet de fabriquer des transistors à effet de champ, à grille isolée par une couche d'oxyde de silicium, plus petits et plus rapides.

1990 : Naissance du premier appareil photographique numérique (APN) sans film [5].

I.2.3 Principe technologique

S'il faut retenir un principe sur le plan technique, c'est que le capteur traduit un signal lumineux en signal électrique à partir des propriétés d'élément chimique spécifiques «semi-conducteurs photosensibles». Ces composés sont appelés transducteurs optoélectroniques.

Suivant le type de capteur, les fonctions réalisées au niveau d'un pixel, c'est-à-dire au niveau d'une cellule élémentaire du capteur sont les suivantes (Figure I.4):

- La conversion de la lumière incidente en une quantité de charges équivalentes à l'intérieur du semi-conducteur.
- Le stockage des charges.
- Le transfert séquentiel des charges (qui correspondent à l'information physique).

- L'amplification du signal électrique (charges) correspondant pour permettre la lecture et la transmission.

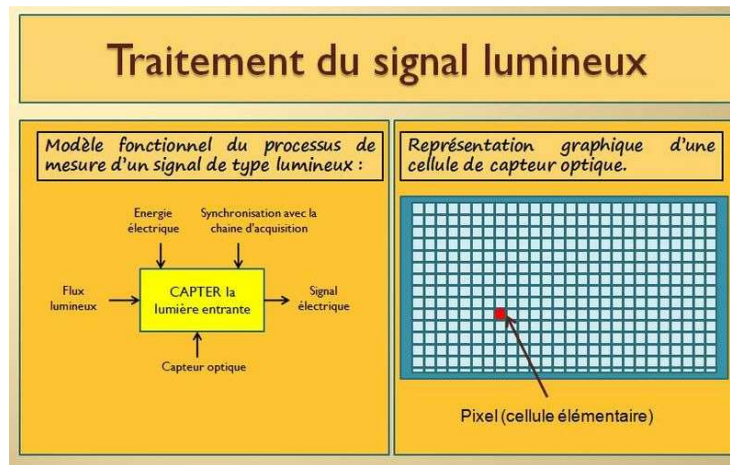


Figure I.4 Modèle fonctionnel du processus de mesure d'un signal de type lumineux[5]

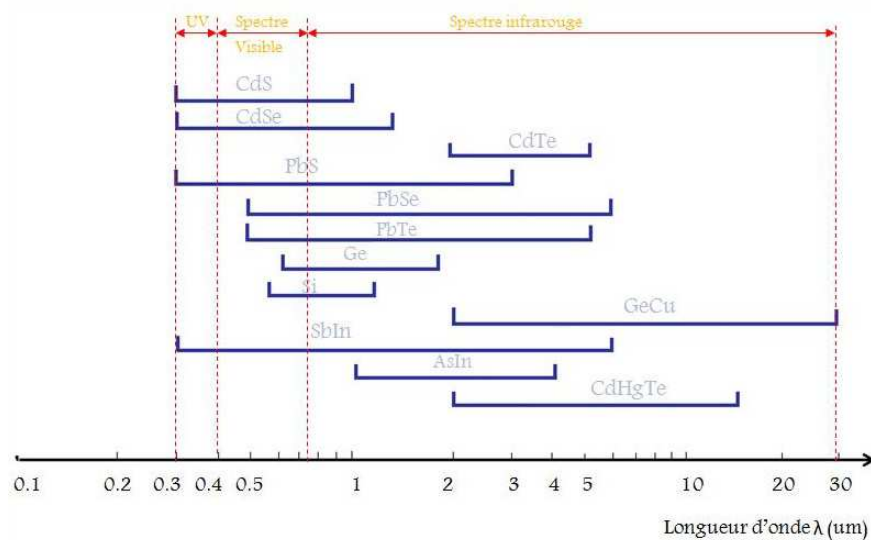


Figure I.5 Les principaux semi-conducteurs utilisés en optoélectronique [5]

I.2.4 Principaux semiconducteurs utilisés en optoélectronique

Les principaux semiconducteurs utilisés en tant que transducteur optoélectronique sont données en Figure I.5.

Parmi ceux-ci, on peut retenir les suivants :

- Le sulfure de cadmium (CdS) et le sélénure de cadmium (CdSe), pour une détection dans le spectre visible.

- Le sulfure de plomb (PbS), pour une détection allant de l'ultra-violet au proche infrarouge.
- Le silicium (Si) qui présente la meilleure sensibilité spectrale aux longueurs d'onde du proche infrarouge.

I.3 Généralités sur les capteurs optiques

I.3.1 Classes d'effets des capteurs optiques

Les capteurs optiques exploitent plusieurs grandes classes d'effets:

L'effet photoélectrique: sous l'effet d'un rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde est inférieure à une certaine valeur, certains matériaux (généralement des métaux) ont la propriété de libérer des électrons.

L'effet pyroélectrique: sous l'effet du changement de température provoqué par le rayonnement électromagnétique, certains cristaux comme le sulfate de tri-glycine se polarisent en surface.

I.3.2 Capteurs optiques pour longueur d'onde voisine Infrarouge et ultra-violet

Utilisés dans des domaines aussi divers que la photographie, l'imagerie spatiale, la reconnaissance de forme, la mesure de déplacement et de déformation à distance, les capteurs optiques sont des capteurs qui convertissent le signal des ondes lumineuses et de longueurs d'ondes voisines (ultraviolet et infrarouge) en signal électrique.

Les capteurs optiques sont divisés en deux grandes classes d'applications:

- Les capteurs d'images (exemple : capteurs CCD, CMOS,...) dans les domaines de la photographie et de la vidéographie.
- Les capteurs industriels (exemple: capteurs photorésistance, photomultiplicateur...) dans les domaines techniques qui correspondent au besoin notamment de l'automatisation des procédés.

I.3.3 Caractéristiques métrologiques d'intérêt

En plus des caractéristiques métrologiques générales du capteur, il en existe trois qui sont spécifiques aux capteurs optiques:

- Le courant d'obscurité.
- La sensibilité spectrale.
- La détectivité

I.3.3.1 Courant d'obscurité

Le courant d'obscurité correspond au courant permanent délivré par le dispositif photosensible en l'absence de flux lumineux (obscurité) et lorsque le capteur est polarisé dans les conditions d'utilisation. Les sources peuvent être internes (libération de porteurs de charge par excitation thermique) ou externe (rayonnement thermique).

Le capteur doit être choisi de telle manière que le courant d'obscurité soit très inférieur au courant photoélectrique, correspondant au signal lumineux minimum que l'utilisateur veut mesurer.

I.3.3.2 Sensibilité spectrale

La sensibilité spectrale correspond à la sensibilité du capteur lorsque le rayonnement reçu est monochromatique [6]:

$$S(\lambda) = \frac{\Delta I_p}{\Delta \phi(\lambda)} \quad (I.2)$$

Le courant dans le capteur est I : $I = I_o + I_p$

Avec I_o : courant d'obscurité

I_p : courant photoélectrique

S : sensibilité du capteur (A/watt, A/lumen, A/lux)

I.3.3.3 La détectivité

La détectivité permet de caractériser le capteur par rapport à son bruit de fond et de qualifier son aptitude à détecter des signaux faibles.

I.3.4 Les différentes typologies des capteurs optiques

Les capteurs optiques peuvent être classés comme tous les autres types de capteur en fonction du critère actif ou passif même si, à l'exception des photorésistances, tous les capteurs optiques sont du type actif.

Les capteurs actifs sont caractérisés par le fait qu'ils assurent une conversion d'énergie propre du mesurande en énergie électrique.

Les capteurs passifs sont des impédances dont l'une des propriétés physiques du matériau constituant le capteur est sensible au mesurande.

I.4 Principaux capteurs optique

I.4.1 Photodiode PIN

Une photodiode PIN est une photodiode composée d'une superposition de 3 zones de semi-conducteurs:

- Une zone P de porteurs positifs (trous) majoritaires.
- Une zone I intrinsèque non chargées (trous et électrons en même nombre).
- Une zone N de porteurs négatifs (électrons) majoritaires.

Entre les zones P et N apparaît sous l'application d'un champ électrique une zone de transition, appelée aussi zone de charge d'espace, qui permet la création et la séparation des paires électron-trou. Une photodiode peut être utilisée en mode photovoltaïque ou en mode photoconducteur.

Remarque : En mode photovoltaïque, la photodiode correspond à un capteur actif puisqu'aucune source de polarisation externe n'est associée à la diode qui, fonctionnant en convertisseur d'énergie, est équivalente à une pile.

Le photo-courant I traversant la photodiode vérifie la loi suivante [5]:

$$I = \frac{e}{h\nu} \cdot [1 - \exp(-\alpha \cdot W)](1 - R_f) \cdot P \quad (\text{I-3})$$

Avec

e : la charge électrique élémentaire.

h : la constante de Planck

ν : la fréquence de l'onde des photons incidents.

α : le coefficient d'absorption.

W : la largeur de la zone d'absorption.

R_f : le facteur de Réflexion de Fresnel du à l'interface air semiconducteur.

P : la puissance optique.

I.4.2 Photodiode à avalanche

La photodiode à avalanche correspond à une diode polarisée en inverse avec une tension inférieure de quelques dixièmes de volt à sa tension de claquage. Les porteurs créés par effet de photoconduction possèdent alors une énergie suffisante pour ioniser par choc des atomes de la zone de transition et créer une nouvelle paire électron-trou. Le processus est répété et débouche sur une multiplication des porteurs de charges. On qualifie alors le phénomène d'avalanche.

Remarque : La structure de la photodiode à avalanche est celle de la photodiode PIN mais utilisée dans la zone d'avalanche.

I.4.3 Phototransistor

Tous les transistors sont potentiellement des phototransistors. Pour éviter cet effet qui est généralement indésirable lorsque le transistor est utilisé en tant que composant électronique, il suffit de le recouvrir d'une paroi opaque. Dans le cas du phototransistor, la paroi est transparente. La base des transistors est le composant MOS (Metal Oxyde Semiconductor). Le MOS est constitué de 4 éléments : la source, le drain, la grille, le substrat.

La source et le drain sont constitués de semi-conducteurs très fortement dopés. La grille est constituée d'une couche isolante de très faible épaisseur surmontée d'une couche très conductrice. Le transistor MOS peut être assimilé à un interrupteur commandé en tension par sa grille, qui laisse passer un courant entre le drain et la source. Concrètement, ce courant est créé par les charges accumulées sous l'isolant de la grille [5].

Remarque : Les grilles doivent être constituées de matériaux transparents comme par exemple du Silicium très fortement dopé, le degré de transparence diminue dans le violet et l'ultraviolet pour des longueurs d'onde inférieures à 400nm.

I.4.4 Capteur CCD et CMOS

I.4.4.1 Généralités

Depuis 1969, lorsque les premiers **CCD** (Charge Coupled Device) ont été inventés par Willard Boyle et George E. Smith (2009 Prix Nobel) dans AT & T Bell Labs, la technologie d'image numérique a aujourd'hui changé la vie humaine [1].

Dans l'histoire de la technologie d'image numérique moderne, CCD et CMOS (Complementary Metal Oxide Semi-conducteur) sont les deux moyens principaux; la plupart des appareils photo numériques utilisent actuellement soit un capteur d'image CCD ou un capteur CMOS; les deux types de capteurs accomplissent la même tâche de capter la lumière et la convertir en signaux électriques.

Au cours des deux dernières décennies, la technologie CMOS a été de plus en plus exploitée pour développer des capteurs optiques intégrés dans les domaines l'Ultra-violet (UV), visible et proche infrarouge (NIR).

Les capteurs CCD (Couple Charge Device) et CMOS (Complementary Metal Oxyde Semi-conducteur) sont des capteurs d'images présents autant dans le domaine des caméras numériques que des appareils photo numériques (APN). Ils correspondent à une matrice de photodiodes miniatures qui permet de recomposer une image par pixellisation.

La différence entre les capteurs CCD et CMOS réside dans l'agencement des photodiodes:

- Les capteurs CCD se composent d'une matrice de cellules photosensibles qui transfèrent la charge vers un **collecteur** qui transfère à son tour l'ensemble des charges vers le convertisseur
- Les capteurs CMOS se composent d'une matrice de cellules photosensibles qui conservent leur charge et la transfèrent **directement** au convertisseur analogique numérique.

Comme on peut le constater sur la figure I.6, les capteurs CCD et CMOS ne présentent pas de différence apparente à l'état de composants. Par contre au niveau de leur structure microscopique, la configuration est totalement différente comme le montre les microphotographies des composants. Alors que la surface de la cellule du capteur CCD est **totalement** réceptive au flux photonique, celle du capteur CMOS est en partie occupée par l'amplificateur et donc **partiellement** réceptive au flux photonique.

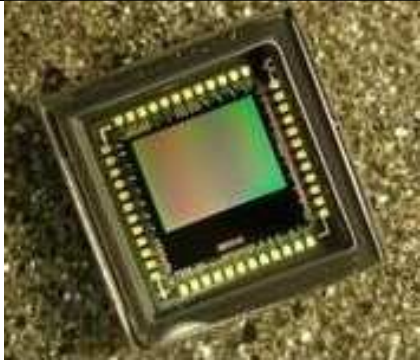
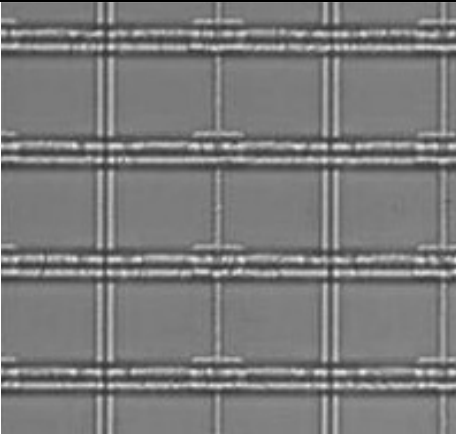
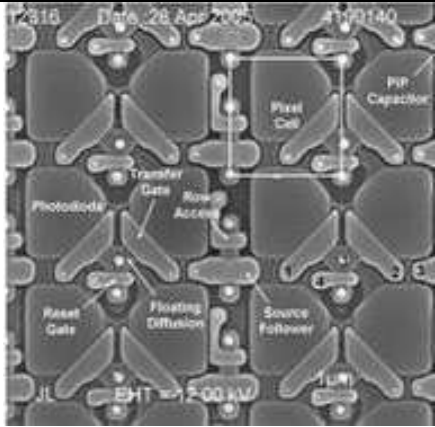
Capteurs CCD	Capteurs CMOS
	
composants	
	
Micrographie	

Figure I.6 Capteurs CCD et CMOS [5]

I.4.4.2 Applications des capteurs CMOS

Les capteurs CCD sont utilisés dans les applications scientifiques et technologiques qui demandent une plus grande précision et une grande sensibilité.

Les capteurs CMOS sont de plus en plus utilisés pour les appareils photographiques numériques et caméra numériques grand public en raison de leur critère de bas **coût**. Il faut savoir que cette technologie est amenée à évoluer et il est fort probable qu'elle puisse à long terme concurrencer les capteurs CCD.

La détection de couleur trouve beaucoup d'applications, comme l'automatisation industrielle, traitement d'images, la micro-instrumentation biomédical, la chimie, les systèmes de communication, la démodulation optique, les capteurs d'image et autres [2].

Beaucoup d'applications exigent l'intégration des dispositifs de détection dans des systèmes VLSI (*Very-Large-Scale Integration*), souvent pour une faible **consommation** et une basse **dimension**.

Le Système d'imagerie est adapté à des fins différentes, selon leur demande, comme les appareils photo numériques, caméscopes, des webcams, caméras de sécurité ou caméras-IR-. La Technologie d'imagerie CMOS a amélioré ses performances, sa capacité fonctionnelle et sa flexibilité au cours des dernières années. Actuellement, les capteurs d'image CMOS ont reçu beaucoup plus d'attention au cours des deux dernières décennies, en raison de leurs caractéristiques prometteuses par rapport aux capteurs CCD conventionnels (voir tableau I.2, I.3). De nouveaux horizons peuvent être ouverts, comme ultra faible énergie ou l'intégration d'une caméra-systèmes sur puce [5].

L'Intégration de la structure BDJ (Buried Double Junction) CMOS sur un système de microanalyse et d'autres recherches basées sur capteur d'image est en cours toujours jusqu'à récemment, comme la détermination de la valeur de PH de la mer, ou dans l'utilisation d'un capteur d'image standard [1]; dans le domaine de l'imagerie, l'utilisation de structures BTJ (Buried Triple Junction) permet de **diminuer le coût** de fabrication et **d'accroître la sensibilité** [7].

Le CCD a occupé donc pendant des longues années le domaine de l'imagerie classique par transfert de charge. La technologie CMOS qui est arrivée bien après le CCD ne peut pas être considérée comme remplaçante de la technologie CCD. Le changement de CCD au CMOS ne peut pas être intégral. Beaucoup de domaine d'applications nécessite l'utilisation de la technologie CCD et les avantages offerts par le CMOS sont surtout dans les fonctionnalités comme les connexions multiples mais des inconvénients sont aussi présents dans le CMOS l'empêchant d'être le seul composant utilisé pour l'imagerie.

I.4.4.3 Avantages des capteurs CMOS

Le capteur d'image CMOS ne pouvait pas rivaliser dans le passé avec la technologie CCD, bien que les premiers capteurs d'image présentée dans les années 60 et début des années 70 utilisent des photodiodes MOS comme des éléments sensibles à la lumière; pendant les années 60 plusieurs œuvres ont été réalisées dans le champ du capteur d'image à semi-conducteurs, utilisant NMOS, PMOS et processus bipolaire. Cependant, ils n'ont pas été

soutenus en raison de leur mauvais rendement et de la grande taille des pixels de par rapport aux capteurs CCD. Même si les capteurs d'image CMOS apparus en 1967, les CCD ont prévalu depuis leur invention en 1969.

Caractéristiques métrologiques	Capteurs CCD	Capteur CMOS
Résolution	Comparable	
Taille des pixels	Comparable	
Sensibilité	Elevée	Moyenne
Bruit	Faible	Elevée
Risques de saturation	Elevée	Faible
Rapidité	Grande	Très grande

Tableau I.2 Comparaison entre les caractéristiques métrologiques des capteurs CCD et les capteurs CMOS [5]

		Critères	
		Principaux avantages	Principaux inconvénients
Capteurs	CMOS	- Possibilité d'adresser individuellement les pixels et de ne lire que certaines zones de la matrice - Compacité (électronique et capteur sur le même composant) - Faible consommation, autonomie - Coût (pour des applications courantes)	- Bruit - Peu sensible à faible luminosité
	CCD	- Qualité d'images élevée - Bruit très faible - Haute sensibilité	- Saturation du capteur aux fortes luminosités - Pas de possibilité de fenêtrage

Tableau I.3 Récapitulatif des principaux avantages et inconvénients de CMOS et CCD [3]

Dans le début des années 1990, le CMOS est réapparu comme une alternative CCD à la merci de ses avantages [1]:

- une faible puissance consommation
- un Coût inférieure,
- des fonctionnalités sur puce et la compatibilité avec la technologie CMOS standard,

- d) la miniaturisation,
- e) l'accès aléatoire des données d'image,
- f) un mécanisme de lecture sélective,
- g) une imagerie à haute vitesse.

I.4.5 Le capteur CMOS BDJ

Les capteurs d'image CMOS (CIS), qui ont émergés comme les autres dispositifs d'imagerie à semi-conducteurs à l'échéance les CCD, offrent des avantages tels que de faible puissance, faible coût et haute intégration de systèmes. Dans ce contexte, un détecteur à CMOS BDJ (Buried Double Junction) « double jonction enterré » été proposé (Figure I.7 et I.8); ce détecteur a une structure qui permet la détection de deux couleurs, le **bleu** «jonction peu profonde » et le **rouge** « jonction plus profonde » (Figure I.7); et il a des caractéristiques intéressantes par rapport à la photodiode PN classique. La conception de la première PD **BDJ** (Photo Diode Buried Double Junction) a été présentée en 1996 par Guo-Neng LU [1].

La technique classique pour la détection de couleurs nécessite trois photo-détecteurs, et des dépôts des filtres optiques sur leur surface **rouge**, **vert** et **bleu** pour avoir une information sur la couleur d'un pixel de l'image. De cette façon, au moins trois détecteurs sont nécessaires pour obtenir des informations de couleur d'un pixel dans une image. Ceci conduit à une augmentation à la fois de la surface silicium et le prix du système de détection de couleur; en outre, le dépôt des teints des polymères nécessite des étapes supplémentaires de traitement non standard.

En général, les méthodes bien connues pour l'identification de couleur ou de mesure de longueur d'onde utilisent des **filtres** de couleur. En principe, trois photo-détecteurs sont couverts respectivement par les filtres **rouge**, **vert** et **bleu** qui **augmente** à la fois **surface** de silicium et le **coût** de mise en œuvre en raison du dépôt de filtres optiques. Dans la structure à jonctions enterrées l'utilisation de filtres optiques déposés sur le détecteur **n'est plus** nécessaire pour déterminer la couleur, comme c'est le cas pour les dispositifs CCD [8].

À l'aide d'une structure double jonctions PN enterrées (BDJ), la dépendance des photocourants I_1 et I_3 de la longueur d'onde peut être mesuré (Figure I.9 et I.10), et la longueur d'onde de lumière incidente peut être identifiée du *ratio* I_3/I_1 [2].

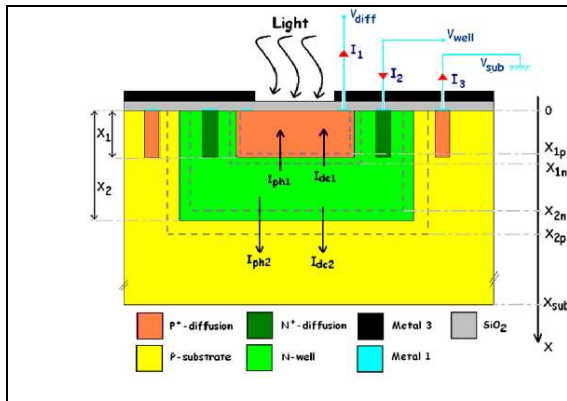


Figure I.7 Coupe transversale du photo-détecteur d'une structure BDJ [1]

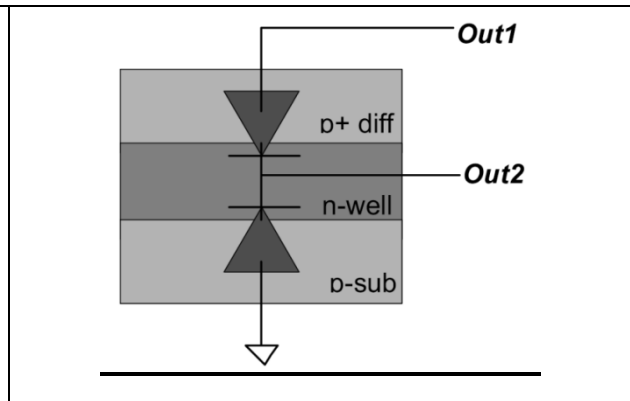


Figure I.8 Structure simplifiée du model BDJ [1]

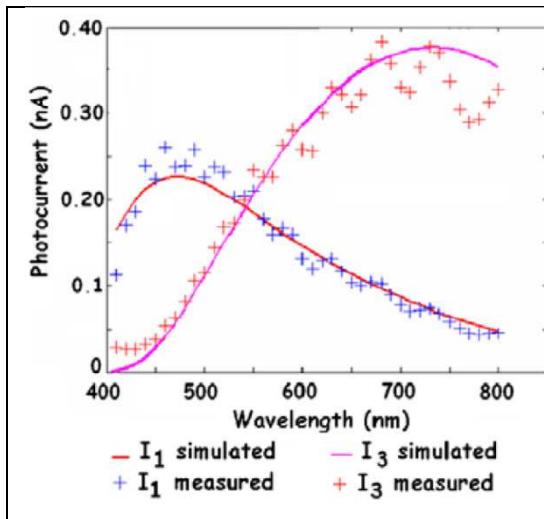


Figure I.9 Les réponses spectrales des jonctions peu profondes et profondes [1]

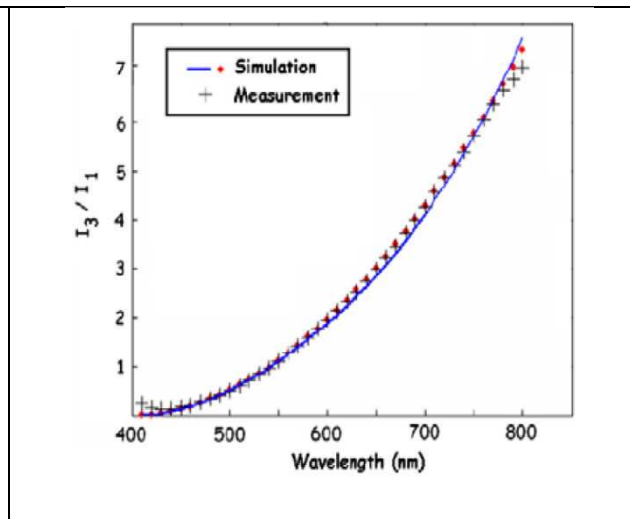


Figure I.10 I₃/I₁ ratio de photo-courant en fonction de la longueur d'onde dans le BDJ [1]

I.4.6 Le capteur CMOS BTJ

La structure BTJ (Buried Triple Junction) à triple jonction PN enterrée qui a été conçu en utilisant une technologie BiCMOS (combinaison de Bipolaire et la technologie CMOS); cette structure utilise la propriété de filtrage optique que présente une jonction enterrée pour réaliser un détecteur de couleur. Le BTJ est une nouvelle technique pour la détection de couleur monochromatique; cette technologie est basée sur la forte dépendance de la profondeur d'absorption du silicium avec la longueur d'onde de la lumière incidente. La plupart des capteurs optiques BiCMOS implique un **compromis** entre le **coût** de mise en œuvre et la **précision** de lecture; alors que leurs objectif est d'augmenter la **sélectivité**, la **sensibilité** et la **fiabilité** [9].

La sensibilité spectrale des trois jonctions enterrées montre trois filtres passe-bande, courbes centrées, respectivement, dans les zones le **bleu**, **vertes** et **rouges** (Figure I.11). Cette fonctionnalité permet d'utiliser des périphériques BTJ déterminant les valeurs trichromatiques d'une couleur.

Puisque le dispositif mise en œuvre a besoin seulement d'un procédé classique bipolaire ou BiCMOS, l'intégration sur puce des composant BTJ avec des circuits électroniques ne nécessite **aucune** étape de fabrication supplémentaire; cela fournit au système une solution **fiable**, peu **coûteuse** pour le système d'imagerie couleur intégré [8].

Contrairement aux photo-détecteurs conventionnels; la structure triple jonction PN enterrée (BTJ) utilisant le procédé BiCMOS, fournit une alternative prometteuse. La BTJ possède trois sorties en fonction de la lumière capturée; donc trois différentes réponses spectrales en fonction de la longueur d'onde (Figure I.11).

Un photo-détecteur CMOS à Triple jonction PN enterrée (BTJ) se compose de trois photodiodes verticalement empilés (Figure I.12 et I.13); il peut être utilisé comme une photodiode avec réponse améliorée de la sensibilité de longueur d'onde. Ceci inclut la description de plusieurs aspects clés directement liés aux performances du dispositif, telles que la réflexion de surface, l'absorption des photons et la génération de paires électron-trou, génération du photo-courant [1].

Les différences de couleur entre la spécification du détecteur et celle du système standard CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) ont été évaluées; une différence moyenne de couleur de **2,15** a été obtenue [8].

Remarque : La structure BTJ à une jonction en plus par rapport à la structure BDJ, cette jonction a une profondeur qui se situe entre les deux jonctions de celle de la BDJ, elle permet de détecter la couleur verte.

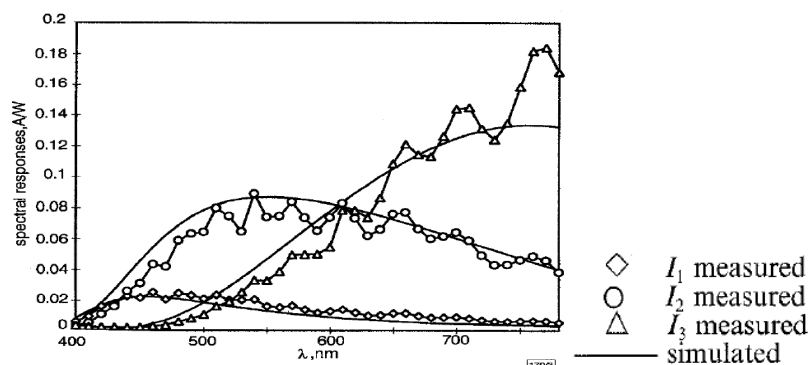


Figure I.11 Réponse spectrale de la structure BTJ (BiCMOS process) [8]

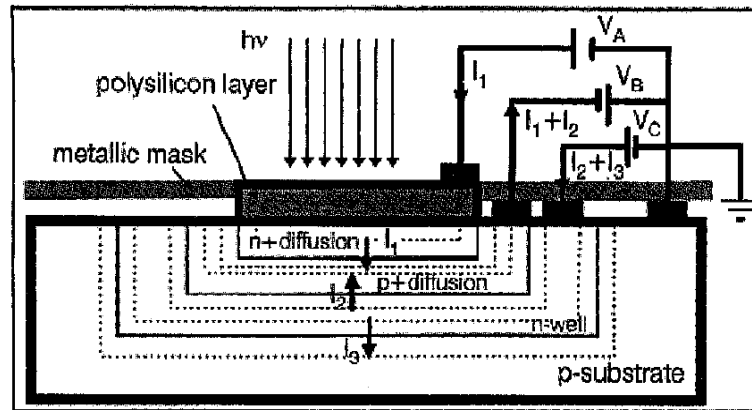


Figure I.12 Coupe de la structure BTJ implémentée en processus BiCMOS [8]

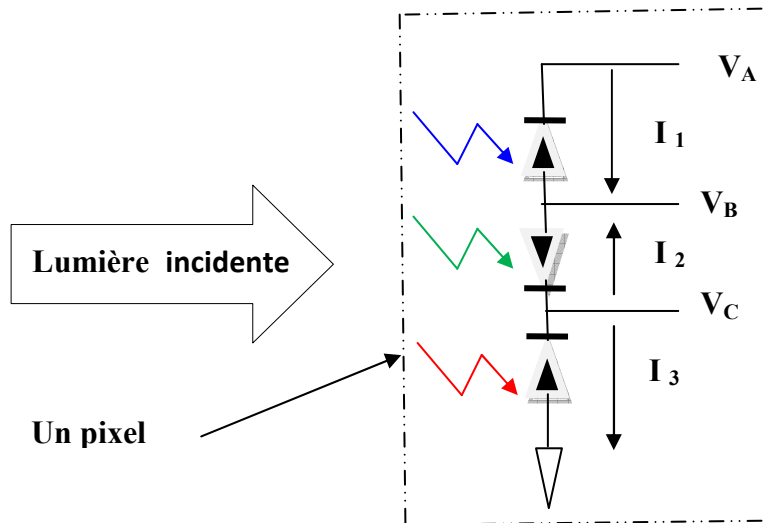


Figure I.13 Structure triple jonction PN enterrée (BTJ)

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une vue d'ensemble sur la lumière et les capteurs optiques a été présentée. Pour la nouvelle génération il y a deux grandes classes de capteurs, les capteurs CCD (Charge Coupled Device) et les capteurs CMOS (Complementary Metal Oxide Semi-conducteur); nous avons présenté une comparaison de leurs caractéristiques principales, les capteurs CMOS ont un faible coût de réalisation, faible consommation, intégration et miniaturisation (moins encombrant); dans ce mémoire on s'intéresse aux capteurs optiques CMOS de structure BDJ (Buried Double Junction) et BTJ (Buried Triple Junction).

CHAPTRE II

STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DU BDJ

II.1 Architecture du capteur d'image CMOS

Il existe plusieurs topologies de capteurs d'image CMOS selon leurs objets. Une norme standard de capteurs d'image CMOS est APS « Active Pixel Sensor ».

L'architecture peut être divisée en quatre blocs principaux (Figure II.1) [1]:

- A- Une matrice de pixels
- B- Processeur Signal analogique
- C- Sélecteur ligne et sélecteur colonne
- D- Synchronisation et contrôle.

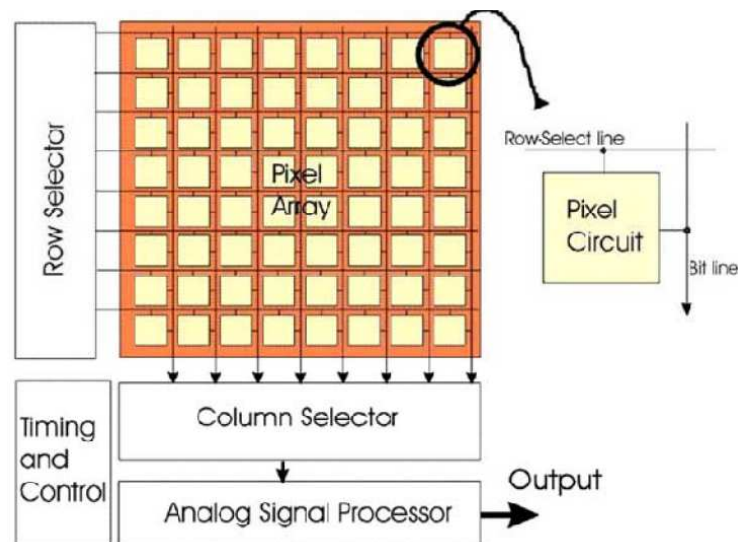


Figure II.1 Le plan du capteur d'image CMOS standard [1]

La première partie, la matrice de pixels (photo-détecteur), un ensemble de dispositifs d'absorption de photons.

Ces Dispositifs semi-conducteurs sont sensibles aux photons; ils fonctionnent par absorption de photons, cette absorption génère des paires électron-trou et les électrons collectés modifient la tension aux bornes de la photodiode qui est proportionnelle à la puissance de la lumière incidente; actuellement les pixels photodiode CMOS sont les plus populaires [1].

II.2 Structure du photo-détecteur BDJ

Le photo-détecteur PD BDJ (Photo Detector Buried Double Junction), est un dispositif sensible à l'**intensité** des photons et à la **longueur** d'onde. Le **coût** du dispositif et l'**intégration** au capteur d'image sont ses caractéristiques exceptionnelles grâce à la technologie basée sur processus BiCMOS.

Comme le montre la figure II.3, les deux jonctions PN enterrées (J1 et J2), agissent comme deux photodiodes PN fournissant les courants I_1 et I_2 sur les sorties (qui sont connectées à $P_diffusion$ et à N_well). Comme avec n'importe quel capteur fonctionnant en mode photoconducteur, une polarisation **inverse** doit être appliquée à chaque jonction PN; Dans le cas présent, il correspond à $V_well > V_diff > V_sub = 0V$, où V_diff , V_well et V_sub sont les potentiels appliqués aux $P_diffusion$, N_well et $P_substrat$ respectivement (Figure II.2).

Le flux lumineux est la puissance totale émise par une source sous forme de rayonnement lumineux. L'éclairement est le rapport du flux lumineux sur une surface recevant ce flux. Le courant photoélectrique est le courant qui traverse un photorécepteur quand ce dernier reçoit un flux lumineux; il dépend de l'éclairement et de la longueur d'onde du rayonnement incident.

Quand un rayonnement est incident sur la surface du détecteur (Figure II.2), les courants circulant dans chaque jonction sont comme suit [1, 4]:

1. Un courant d'obscurité (I_{dc1} , I_{dc2}), représente le courant mesuré par pixel en absence toute illumination, il est principalement dû au courant de saturation inverse de la photodiode
2. Un photo-courant (I_{ph1} , I_{ph2}), en raison des particules générées par la lumière (photons) tombant sur la zone de détection.

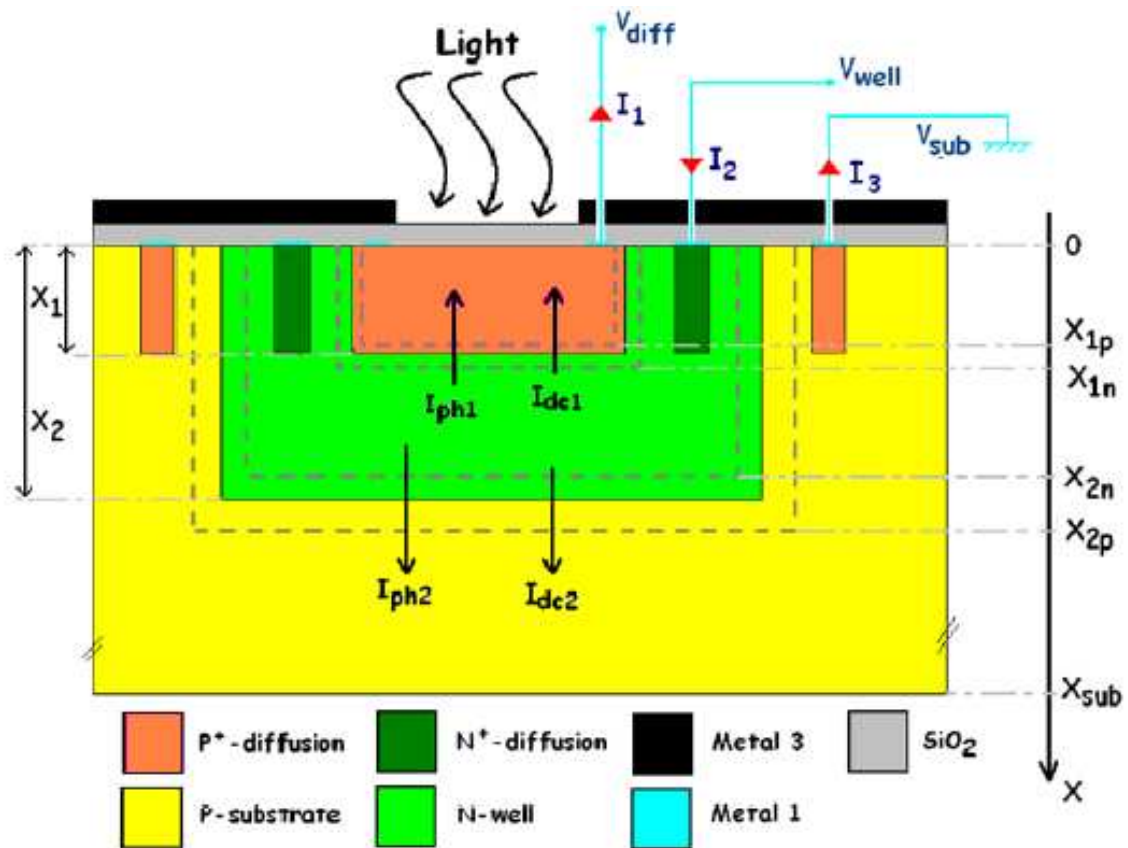


Figure II.2 Coupe transversale du photo-détecteur d'une structure BDJ [1]

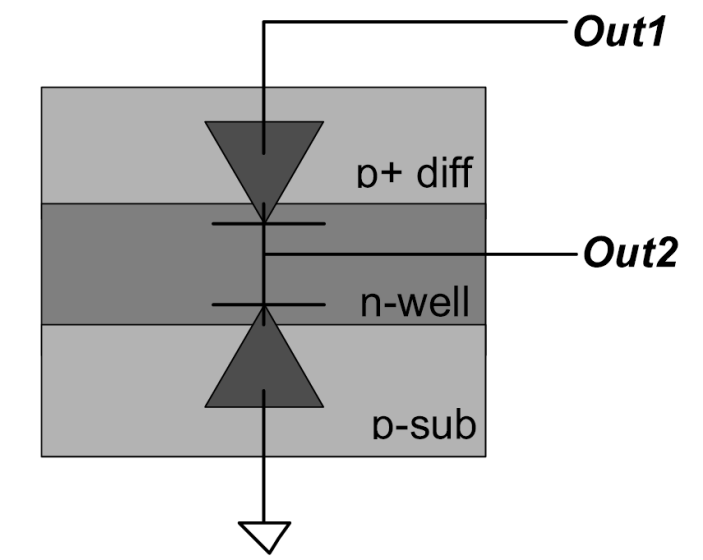


Figure II.3 Structure simplifié du model BDJ [1]

II.3 Coefficient de réflexion

Une partie de la lumière incidente est réfléchiée sur la surface de la structure de silicium [1, 10, 11]; alors que la partie transmise d'un flux de photons peut être exprimée comme suit:

$$\phi_t(\lambda) = (1-R(\lambda)).\phi(\lambda) \quad (\text{II.1})$$

Avec $\Phi_t(\lambda)$: la partie du flux de photons transmise,

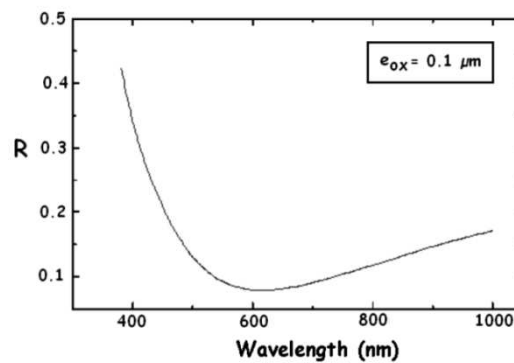
$\Phi(\lambda)$: le flux de photons incident (photon/s/ cm²)

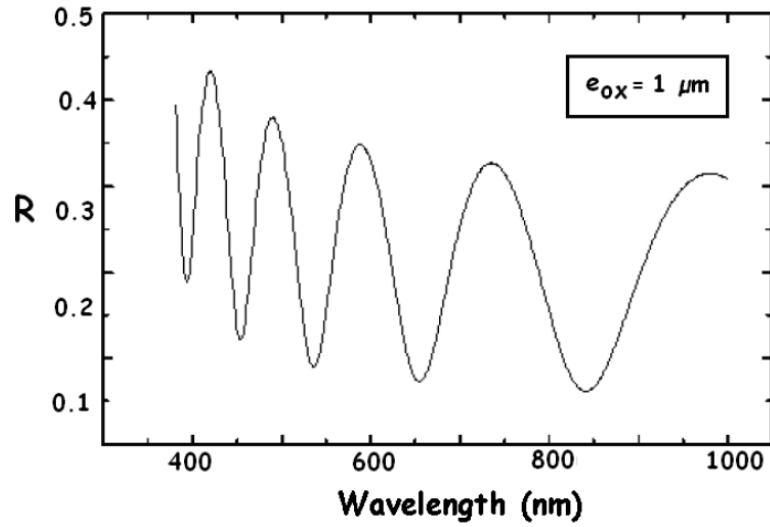
$R(\lambda)$: le coefficient de réflexion

Un détecteur CMOS a une couche SiO₂ sur sa surface, le coefficient de réflexion de cette couche de passivation diffère de l'air et de silicium; cela provoque des réflexions à la fois aux interfaces air/SiO₂ et SiO₂/Si. Comme il est une couche mince, il y a des effets d'interférence entre ces réflexions, ce qui se traduit par des variations d'oscillation du coefficient de réflexion de surface efficace par rapport longueur d'onde; la figure II.4 montre ces variations en fonction de l'épaisseur de SiO₂ (e_{ox}). Dans le cas des capteurs d'image CMOS, ces réflexions peuvent conduire à une perte de contraste et la netteté des images obtenues [1].

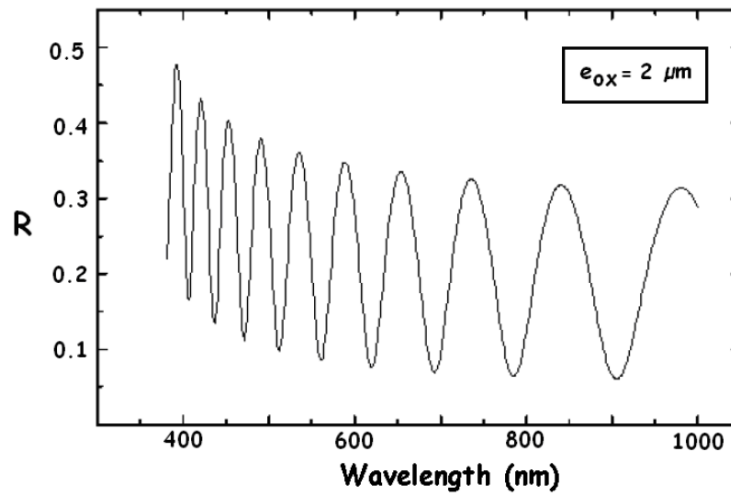
A Partir de l'équation (II-1), il peut être vu que la lumière réfléchiée du signal détecté est définitivement perdu; cela conduit à une diminution de l'efficacité quantique ; une solution pour minimiser les effets de réflexion inclut des revêtements antireflets et un choix approprié de l'épaisseur de la couche de surface [1].

Remarque: le coefficient de réflexion $R(\lambda)$ a généralement une valeur entre 0.25 et 0.35 (voir équation II.7) [12]





-b-



-c-

Figure II.4 Les résultats des simulations du coefficient de réflexion R par rapport longueur d'onde pour différentes épaisseurs SiO_2 ,
 (a) $e_{\text{ox}}=0.1\mu\text{m}$, (b) $e_{\text{ox}}=1\mu\text{m}$, (c) $e_{\text{ox}}=2\mu\text{m}$ [1]

II.4 Taux de génération de paires électron-trou

Quand un flux de photons d'énergie $E \geq E_g$ ($E = h \cdot \nu = h \cdot c / (n \cdot \lambda)$) pénètre à l'intérieur de la masse de silicium, un processus de conversion photoélectrique se produit; l'absorption d'un photon dans la masse de silicium induit la génération de paires électron-trou.

Le taux de génération de paires électron-trou est égal aux taux de disparition des photons $g(x) = -\frac{d\phi(x)}{dx}$, est proportionnel à la quantité de photons, donc aux flux de photons $\phi(x)$ à l'abscisse x [10, 12]:

$$-\frac{d\phi(x)}{dx} = \alpha \cdot \phi(x) \quad (\text{II-2})$$

α : Le coefficient d'absorption du matériau, il est défini comme la variation relative de la densité de rayonnement par unité de longueur

$$\alpha(x, \lambda) = -\frac{1}{\phi(x, \lambda)} \cdot \frac{d\phi(x, \lambda)}{dx} \quad (\text{II-3})$$

Lorsque $d\phi$ est négatif le coefficient α est positif, c'est à dire qu'il y a absorption du rayonnement. Si α est constant dans tout le matériau, $\alpha(x, \lambda) = \alpha(\lambda)$ et l'intégration de l'expression précédente donne: $\ln(\phi(x, \lambda)) = \ln(\phi_t(\lambda)) - \alpha(\lambda) \cdot x$

$$\phi(x, \lambda) = \phi_t(\lambda) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot x) \quad (\text{II-4})$$

Le taux de génération électron-trou dépend de la longueur d'onde de la lumière incidente et de la profondeur x de la surface de silicium [10, 12]:

$$g(x, \lambda) = \phi_t(\lambda) \cdot \alpha(\lambda) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot x) \quad .$$

$$g(x, \lambda) = [1 - R(\lambda)] \cdot \phi(\lambda) \cdot \alpha(\lambda) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot x) \quad (\text{II-5})$$

x : la profondeur dans la masse de silicium (voir figure II.2)

$\Phi_t(\lambda)$: la partie du flux de photons transmis

$\Phi(\lambda)$: le flux de photons incident

$[flux = I/(h \cdot \nu)]$. Tel que I = intensité de rayonnement (W/m^2)

Si le rayonnement n'est pas monochromatique, le taux global de génération de paires électron-trou au point d'abscisse en intégrant l'expression précédente sur tout le spectre [12], soit:

$$g(x) = \int_{\lambda} g(x, \lambda) \cdot d\lambda \quad .$$

$$g(x) = \int_{\lambda} [1 - R(\lambda)] \cdot \phi(\lambda) \cdot \alpha(\lambda) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot x) \cdot d\lambda \quad (\text{II-6})$$

Si $\alpha(\lambda)$ est petit, le rayonnement est faiblement absorbé, il pénètre profondément dans le matériau et il crée peu de porteurs par unité de volume mais dans un grand volume; si $\alpha(\lambda)$ est grand, le rayonnement est très absorbé, les porteurs sont créés dans un petit volume au voisinage de la surface.

L'intégration de l'expression (II-6) nécessite la connaissance des lois de variation du coefficient de réflexion $R(\lambda)$ et du coefficient d'absorption $\alpha(\lambda)$ du semi-conducteur avec l'énergie.

Le coefficient de réflexion $R(\lambda)$ est fonction de la nature du semi-conducteur, mais en règle générale varie peu avec l'énergie pour des rayonnements dont l'énergie est voisine du gap du matériau, on peut écrire $R(\lambda)=R$; par contre sa valeur est très sensible à l'angle d'incidence du rayonnement [12], elle est minimum en incidence normale ou elle est donnée par:

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \left(\frac{\sqrt{\epsilon_r}-1}{\sqrt{\epsilon_r}+1} \right)^2 \quad (\text{II-7})$$

n : l'indice de réfraction du matériau

ϵ_r : la constante diélectrique relative du matériau

Pour tous les semi-conducteur n varie entre 3 et 4 de sorte que R varie entre 0.25 et 0.35 [12]. Ainsi, dans les meilleures conditions c'est-à-dire en incidence normale, environ 30% du rayonnement excitateur est réfléchi par le semi-conducteur.

La loi de variation de $\alpha(\lambda)$, est sensiblement la même pour tous les semi-conducteurs à gap direct, elle est représentée sur la figure II.5 pour le *GaAs* à la température ambiante. Ses caractéristiques essentielles, communes à tous les semi-conducteurs à gap direct, sont d'une part une variation sensiblement en marche d'escalier, $\alpha(\lambda) \approx 0$ pour $E < E_g$ et $\alpha(\lambda) \approx \alpha = Cte$ pour $E > E_g$, et d'autre part l'ordre de grandeur, $\alpha(\lambda) \approx 10^4 \text{ cm}^{-1}$ [12].

En d'autres termes les photo-porteurs sont créés sur une épaisseur de quelques microns à partir de la surface. Il en résulte que la vitesse de recombinaison en surface joue un rôle fondamental dans le rendement des composants optoélectronique [12].

Dans la mesure où le coefficient $\alpha(\lambda)$ est sensiblement constant pour $E > E_g$ tant que E n'est pas trop important, on peut écrire $\alpha(\lambda) = \alpha$ et intégrer l'expression (II-6)

$$g(x) = [1 - R]. \alpha. \exp(-\alpha. x) \int_{E_g}^{\infty} \phi(E). dE \quad (\text{II-7})$$

En appelant ϕ , la densité totale du rayonnement d'énergie supérieur au gap du semiconducteur, l'expression précédente s'écrit

$$g(x) = [1 - R]. \alpha. \phi . \exp(-\alpha. x) \quad (\text{II-8})$$

Pour une profondeur x_d donnée, en changeant la longueur d'onde de la lumière incidente, le taux génération de porteurs varie (Figure II.6). Pour une profondeur $x=x_d$, $g(x,\lambda)$ est maximisé à une certaine longueur d'onde λ_p , qui est liée à la profondeur x_d ($x_d=\alpha^{-1}(\lambda_p)$) [12]; ce résultat peut être obtenu à partir l'équation (II-4).

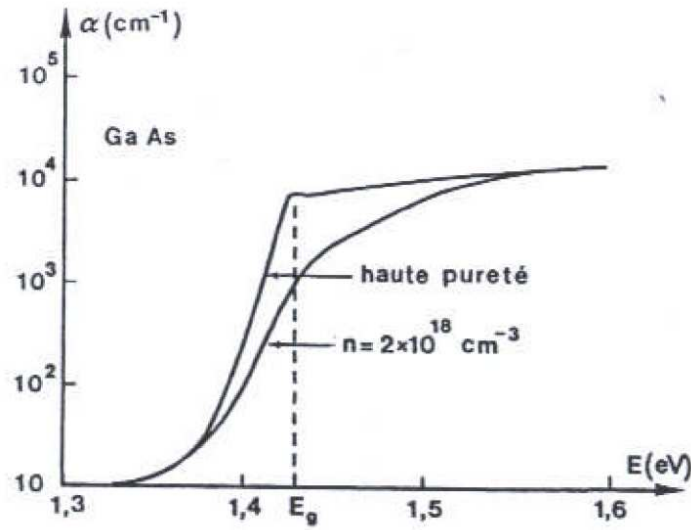


Figure II.5 Coefficient d'absorption de GaAS à la température ambiante [12]

Si une jonction enterrée PN est formée à une profondeur x_d , et dans des conditions de polarisation inverse, les porteurs photo-générés dans la zone de **déplétion** seront séparés par le champ électrique, ce qui conduit à un courant de **conduction**; alors que dans les régions **neutres**, les porteurs photo-générés se déplaçant aux frontières de la zone de déplétion contribuent aux courants la **diffusion**; ces composants du photo-courant sont directement liés au taux de génération. Ainsi, la réponse spectrale de la jonction enterrée donne une courbe de pointe unique qui atteint son maximum à proximité de la longueur d'onde λ_p ; quand on augmente la profondeur de la jonction, la longueur d'onde de pointe augmente (figure II.6).

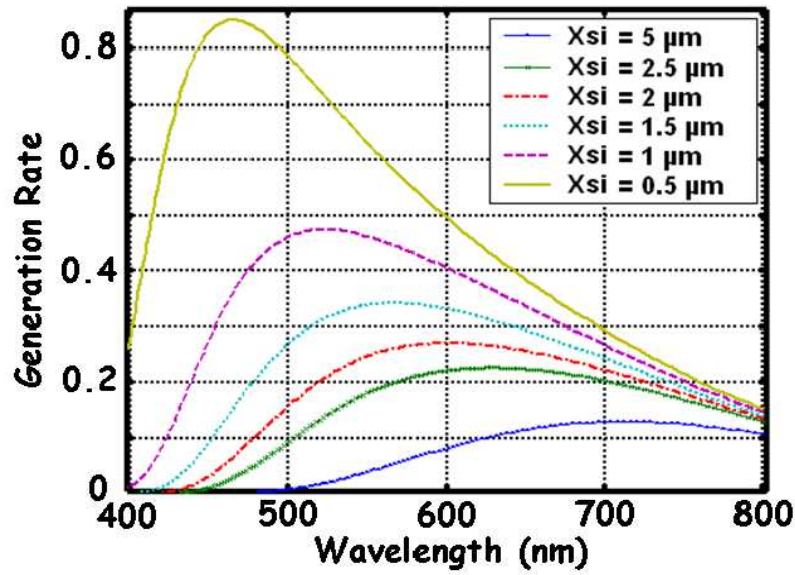


Figure II.6 Simulation du taux de génération normalisée des paires électron-trou par rapport à la longueur d'onde, pour plusieurs profondeurs dans le silicium intrinsèque [1]

En mettant en œuvre deux jonctions enterrées sous forme empilée, il y aura deux photo-courants passant par les deux jonctions. Leurs réponses spectrales montrent deux courbes spectrales, chacune ayant un pic avec la longueur d'onde de pointe en fonction de la profondeur de jonction (Figure II.9). Les deux longueurs d'onde de pointe situées, respectivement, dans les zones le **bleu** et **rouges**; donc le dispositif peut fonctionner pour la détection de couleur; un tel dispositif peut être mis en œuvre avec un processus bipolaire ou BiCMOS [1].

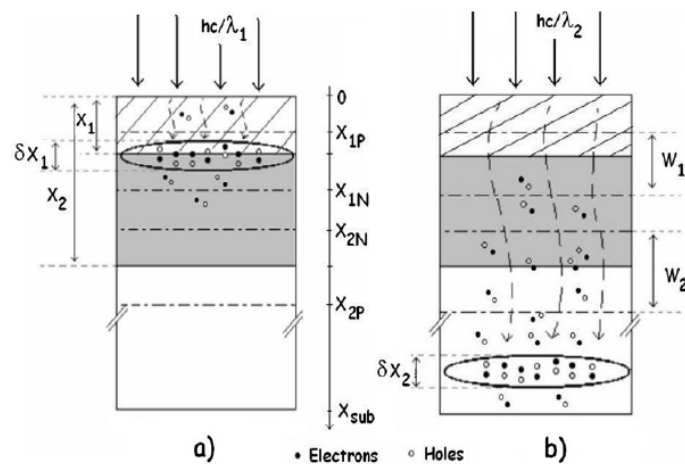


Figure II.7 Les porteurs Photo-générés à l'intérieur du détecteur BDI dans le cas de (a) la lumière bleue ($\lambda \sim 450$ nm) et (b) la lumière rouge ($\lambda \sim 680$ nm) [1].

La figure II.7 schématise les profondeurs où se trouvent la plupart des porteurs photo-générés; pour la lumière **bleue**, cette profondeur est d'environ **0,2 μm** , et pour la lumière **rouge**, elle est d'environ **5 μm** [1] (dans la structure triple jonction enterrée BTJ, la détection de la lumière verte est à environ **0.6 μm** [13]). La profondeur de la région des porteurs photo-générés à l'intérieur d'un détecteur BDJ, en fonction de la longueur d'onde, est donnée par la courbe dans la figure II-7; alors que la figure II-6 montre le taux de génération calculé en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs profondeurs dans le silicium.

Le coefficient d'absorption dans l'équation (II-3) est évidemment un paramètre clé; il dépend fortement de la longueur d'onde (Figure II.8) [1].

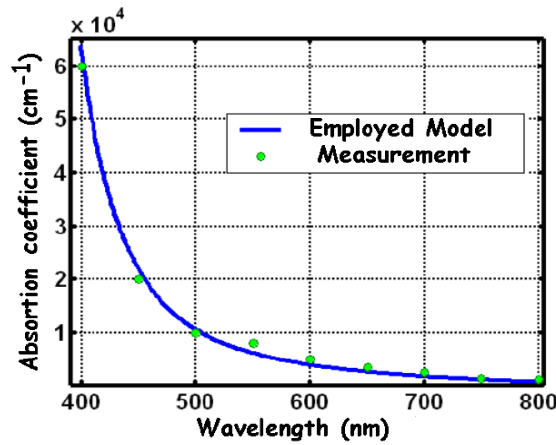


Figure II.8 Coefficient d'absorption de la lumière visible incidente par rapport longueur d'onde, dans le silicium, à 298 K [1].

II.5 Photo-courant

Normalement, les photo-détecteurs sont polarisés en inverse. Sous l'éclairage, le courant dans chaque jonction a deux composantes: une composante photo-courant (photo-générer) et une composante d'obscurité (voir figure II.2).

Ainsi, les deux courants de sortie peuvent être exprimés comme suit [1, 4, 14]:

$$I_1 = I_{ph1} + I_{dc1} \quad (\text{II-9-a})$$

$$I_2 = I_{ph1} + I_{dc1} + I_{ph2} + I_{dc2} = I_1 + I_3 \quad (\text{II-9-b})$$

Ainsi, deux réponses spectrales sont disponibles à partir du même pixel, en forme passe-bande centré sur deux longueurs d'ondes différentes (Figure II-9.). Par ailleurs, comme représenté sur la Figure II.10, le rapport du courant de sortie I_3/I_1 montre une fonction

monotone croissante avec la longueur d'onde λ . Ainsi, pas de nécessités des filtres optiques pour les applications couleur, par conséquent, nous nous attendons à une acquisition plus efficace de lumière et un dispositif moins coûteux. Ces propriétés font de ce composant particulièrement attractif pour la de détection de couleur, pour mesure l'intensité lumineuse et de mesure de longueur d'onde de lumière monochromatique [14].

Le fonctionnement du dispositif est basé sur la propriété du silicium d'absorber chaque longueur d'onde de rayonnement à une profondeur différente, il est basé sur la dépendance du coefficient d'absorption $\alpha(\lambda)$ de la longueur d'onde [1, 12, 14, 15]. La lumière **bleue** est absorbée **près de la surface** de silicium tandis que la lumière **rouge** a une pénétration **plus profonde**; par conséquent, la jonction peu profonde a une réponse sensible à la lumière **bleue**, car elle ne recueille que les porteurs photo-générés près de la surface de silicium; d'autre part, la jonction profonde est sensible à la lumière **rouge** et proche de l'infrarouge grâce aux porteurs générés dans une région plus profonde.

Les réponses spectrales des deux jonctions sont présentées dans la figure II.9; en outre, les mesures des deux courants de sortie permettant d'estimer le ratio photo-courant I_3/I_1 . Comme le montre la figure II.10, ce ratio est monotone croissant avec la longueur d'onde; par conséquent, le détecteur BDJ peut être employé comme un dispositif sensible à la couleur ou à la longueur d'onde.

Quand un flux de lumière monochromatique $\Phi(\lambda)$ est incident sur la surface du détecteur, seule la partie $\Phi_t(\lambda)$, tel que $[\Phi_t(\lambda) = (1-R(\lambda)).\Phi(\lambda)]$, peut pénétrer dans le composant; sous la condition que le photon incident est une énergie supérieure à l'écart de la bande d'énergie du silicium ($E_{g, Si} = 1.12eV$). Le taux de génération $g(x, \lambda)$, à une profondeur x , est lié au coefficient d'absorption $\alpha(\lambda)$ selon la relation $g(x, \lambda) = \phi(\lambda). \alpha(\lambda). \exp(-\alpha(\lambda).x)$ [12]

Sous conditions polarisation inverse, chaque jonction recueille charges photo-générés à l'intérieur et autour de sa zone de déplétion; le photo-courant résultant à travers la jonction a donc deux composantes: un courant de conduction et un courant de diffusion. Le courant de conduction correspond à des charges collectées dans la zone de **déplétion**, et le courant de diffusion correspond à des charges collectées par les deux régions quasi **neutres** [4].

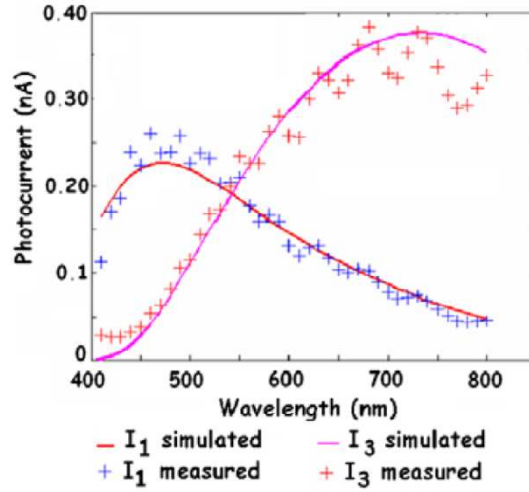


Figure II.9 Les réponses spectrales des photo-courants de jonction peu profonde et profonde dans le BDJ [1, 14]

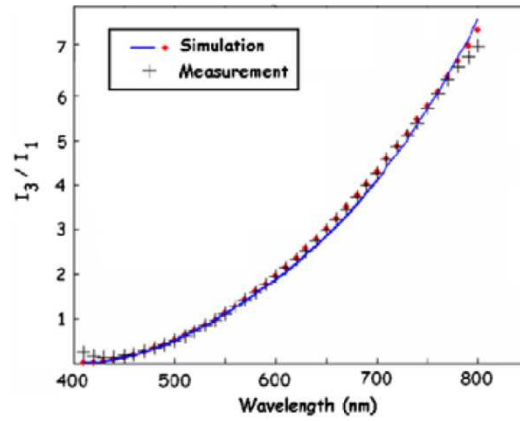


Figure II.10 I_3/I_1 ratio de photo-courant en fonction de la longueur d'onde dans le BDJ [1, 14]

II.5.1 Courant de conduction

Le Courant de conduction, correspondant à des porteurs de charge qui sont photo-générés dans la zone de **déplétion**.

Grâce au champ électrique interne dans la région de déplétion, les trous et électrons photo-générés sont rapidement séparés et de débit dans des directions opposées. Presque toutes ces charges contribuent au photo-courant sans être affectées par recombinaison électron-trou, qui est un processus beaucoup plus lent. Le courant de conduction peut donc être calculé en intégrant le taux de génération à travers la zone de déplétion [1].

$$I_{dr\theta} = q \cdot A_{\theta} \cdot \int_{W_{\theta}} g(\lambda, x) \cdot dx = q \cdot A_{\theta} \cdot \phi_L \cdot \exp(-\alpha \cdot W_{\theta}) \quad (\text{II-10})$$

Où q est la charge élémentaire, A_θ est la surface active ($\theta=1$ ou 2) en fonction du courant considéré, W_1 et W_2 désignent les largeurs des zones de déplétion (Figure II.7).

II.5.2 Courant de diffusion

La diffusion des porteurs minoritaires dans la région **quasi-neutre** vers la région frontière de la zone de déplétion est un processus relativement lent. En raison de la recombinaison, seule les porteurs de charge photo-générés au sein d'une longueur de diffusion de la frontière de la zone de déplétion peuvent être collectés et ils contribuent au photo-courant.

Afin de déterminer les courants de diffusion à l'intérieur du détecteur BDJ, la concentration des porteurs minoritaires excédents devrait d'abord être calculée en résolvant l'équation de continuité avec les conditions aux limites appropriées [1].

Les Composantes de diffusion peuvent alors être déterminées pour les différents types de couche par [1] :

$$I_{diff,p} = q \cdot A \cdot D_p \cdot \left. \frac{\partial p_n}{\partial x} \right|_x \quad (\text{II-11-a})$$

$$I_{diff,n} = - q \cdot A \cdot D_n \cdot \left. \frac{\partial n_p}{\partial x} \right|_x \quad (\text{II-11-b})$$

Où D_p et D_n sont le coefficient de diffusion pour les trous et les électrons respectivement, p_n et n_p sont la concentration des porteurs minoritaires en excès dans la région quasi-neutre. Le courant de diffusion est représenté par la direction et la position, par exemple, $I_{diff,11}$ est le courant de minorité à travers la région P^+ , tandis que $I_{diff,22}$ est le courant de minorité à travers la région du substrat P (Figure II.2).

Après évaluation de toutes les composantes, les deux photo-courants à travers la jonction superficiel et la jonction de profondeur peuvent être respectivement déterminée comme ci-dessous [1]:

$$I_{ph1} = I_{diff,11} + I_{diff,12} + I_{dr1} \quad (\text{II-12-a})$$

$$I_{ph2} = I_{diff,22} + I_{diff,21} + I_{dr2} \quad (\text{II-12-b})$$

Les figures II.11 et II.12 montre un exemple des photo-courants calculés I_{ph1} et I_{ph2} , pour une intensité de lumière incidente donnée ($1 \mu W.cm^{-2}$) [1]. Leurs variations, en fonction

de la longueur d'onde représente la réponse spectrale. Les paramètres correspondent à un détecteur BDJ de $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ conçu dans une technologie CMOS $0,35\mu\text{m}$ -AMS [1].

Les tensions de polarisation sont également incluses dans ces calculs (pour déterminer les profondeurs de la couche de déplétion), les effets de ces paramètres sur la réponse globale peuvent être évalués. Comme il ressort de la figure II.11 et II.12, les tensions de polarisation n'ont pas une forte influence sur les photo-courants.

De la même manière, la dépendance en température de I_{ph1} et I_{ph2} peuvent être estimés, à condition que les calculs incluent des modèles précis des paramètres de la sensibilité de la température tels que le coefficient d'absorption, le coefficient de diffusion, la mobilité des porteurs de charge, la concentration de porteurs intrinsèques, etc.

Quand la structure BDJ fonctionne comme un détecteur sensible à la longueur d'onde, le ratio de photo-courant est également une caractéristique importante du capteur; sa dépendance en température prédite par les calculs théoriques est confirmée par des mesures expérimentales; la figure II.13 représente un excellent accord pour les résultats.

Le ratio de photo-courant montre une diminution régulière quand la température augmente; pour compenser les effets de température, il est nécessaire d'appliquer certaines mesures de la température sur la puce. Une solution simple suggère l'utilisation d'une résistance de N_{well} comme une thermistance [1].

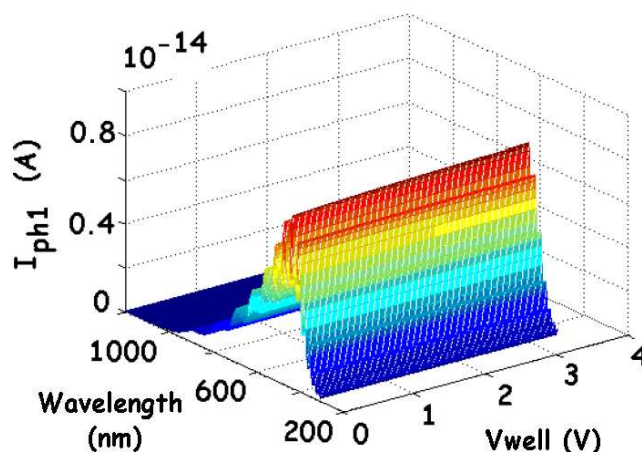


Figure II.11 Le photo-courant I_{ph1} de la jonction peu profonde du détecteur BDJ par rapport à la longueur d'onde et la polarisation inverse [1]

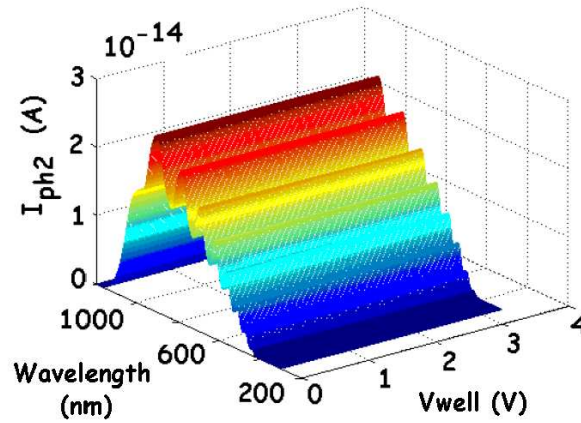


Figure II.12 Le photo-courant I_{ph2} de la jonction profonde (effectuer sous Matlab) [1]

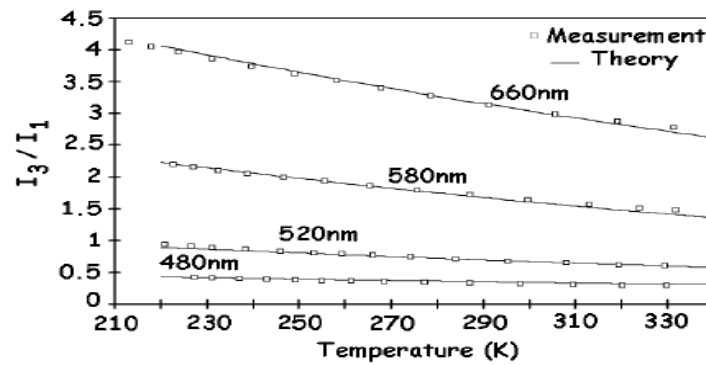


Figure II.13 Ratio de photo-courant I_3/I_1 en fonction de la température [1].

II.6 Courant d'obscurité (de fuite)

Sans éclairage, le courant de fuite circulant à travers une jonction PN polarisée en inverse est appelé courant d'obscurité. Ce courant dépend des caractéristiques de jonction, et il superpose sur celui dû aux porteurs générés par la lumière

Le bruit est défini comme toute fluctuation superposer au signal utile et tend à obscurcir son contenu d'information, le courant d'obscurité sera considérée comme l'une des composantes de bruit. La valeur de ce courant impose une limite physique sur les deux critères essentiels de tout photo-détecteur, à savoir la portée de détection optique et le bruit de fond. La valeur particulière du courant d'obscurité varie d'échantillon à échantillon et dépend de la qualité de fabrication la température, niveau de dopage, tension de polarisation, de la conception du capteur. Il est supposé être principalement dû à des transporteurs générés

thermiquement, mais il peut également être sérieusement augmenté en raison de défauts dans le Semi-conducteur, les dislocations, et la contamination par des impuretés indésirables en cours de fabrication. Ainsi le courant d'obscurité peut être utilisé comme un outil de diagnostic pour la qualité et la fiabilité des détecteurs CMOS [14].

II.7 Structure du photo-détecteur BTJ

La figure II.14 montre la section transversale d'une structure BTJ (Buried Triple Junction) mise en œuvre avec le processus n_well BiCMOS. Ainsi Les trois jonctions enterrées sont formées entre les couches $n+$, $p+_{diffusion}$, le n_well et le $p_substrat$). L'épaisseur de ces couches détermine la profondeur de la jonction; tous les trois jonctions enterrées sont empilées verticalement et polarisées en inverse par les trois tensions appliquées V_A , V_B , et V_C (Figure II.15). Pour éviter la contribution des photo-courants latéraux aux trois photo-courants : I_1 , I_2 et I_3 qui représentent, respectivement, courants de jonction peu profonde, moyennement profonde et profonde, les zones environnantes de la structure sont recouvertes d'une couche métallique opaque. Trois courants externes I_1 , (I_1+I_2) et (I_2+I_3) qui circulent à travers les électrodes A , B et C , respectivement peuvent être mesurés.

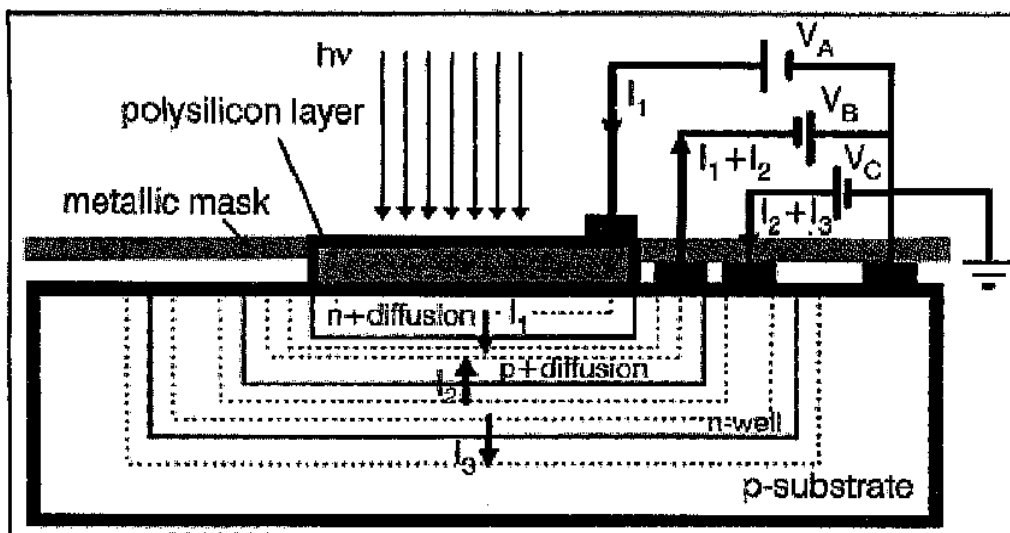


Figure II.14 Coupe transversale de la structure BTJ mise en œuvre dans le processus de BiCMOS [8]

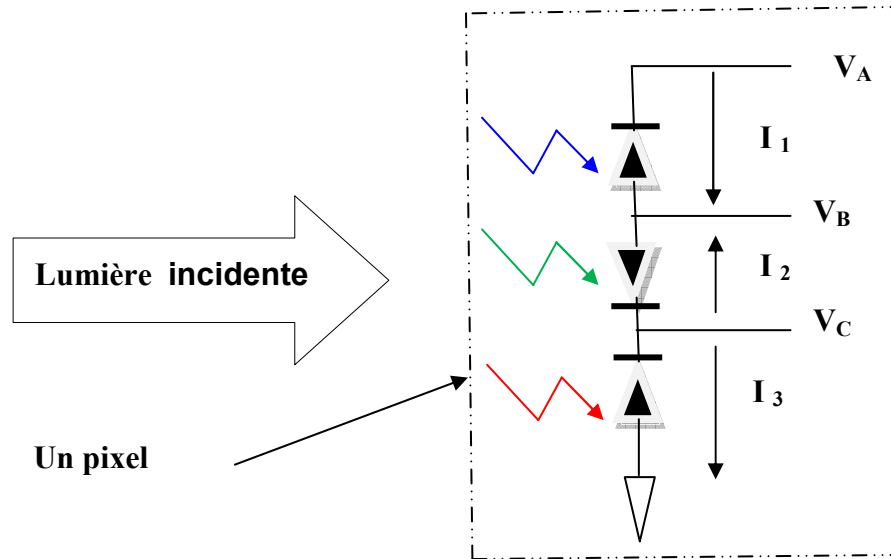


Figure II.15 Structure triple jonction PN enterrée (BTJ)

II.7.1 La conception de puce et de mesure

Figure II.16 montre une puce de test conçue et fabriquée dans un $1.2\mu\text{m}$, double poly-Si, double métal, n_well Processus BiCMOS. Il contient quatre tableaux séparés de 14×14 cellules BTJ [8]. Chaque cellule a une surface active de $28 \times 28 \mu\text{m}^2$, les cellules BTJ dans chaque tableau sont connectées en parallèle pour former une structure de grande surface BTJ, afin d'obtenir plus de photo-courants pour la caractérisation de périphérique.

Les mesures de la puce fabriquée ont été effectuées afin d'obtenir la réponse spectrale de la structure BTJ. Une lampe halogène et un monochromateur M25 Jobin-Yvon a été utilisé comme une source de lumière longueur d'onde variable. Les mesures ont été faites avec un Analyseur HP4145B semi-conducteurs qui fournit également une polarisation inverse de tension. La puissance optique incidente a été mesurée en utilisant une photodiode au silicium étalonné.

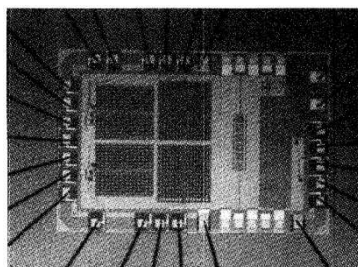


Figure II.16 Microphotographie de puce contenant quatre matrices de cellules BTJ [8]

II.7.2 Réponse spectrale

Un programme de modélisation à base de dispositif physique a été également utilisé pour calculer les différents photo-courant composants ainsi que trois courants de jonction dans la structure BTJ [8]. Des simulations ont été effectuées avec des paramètres donnés par le fabricant du BTJ; la figure II.17 montre la réponse spectrale du BTJ obtenus par simulation et par mesures.

En dehors de quelques fluctuations sur les trois courbes expérimentales, qui sont dues à la réflexion de la couche de passivation de surface SiO_2 de la puce, il ya un bon accord entre les résultats calculés et mesurés. On peut voir sur la figure II.17 que la jonction peu profonde atteint son maximum de sensibilité au 480nm, correspondant à la région bleu; le sommet de sensibilité de la jonction moyenne au 530nm, qui est dans la zone verte, et le sommet de jonction profonde à 770nm, ce qui correspond à la couleur rouge, ou près de la région infrarouge.

Ces réponses spectrales ont été comparées avec celle de TEXAS INSTRUMENTS CCD avec une transmission de 40% des filtres de couleur. La réponse maximale de la CCD avec un filtre bleu est $\sim 6 \times 10^{-2}$ A/W à 480nm, ce qui est deux fois celle de la jonction peu profonde du capteur BTJ. À 550nm, la réponse de la CCD avec un filtre vert est de $\sim 7 \times 10^{-2}$ A/W, ce qui est proche de celle de la jonction du milieu. Dans la zone rouge, la réponse de la CCD avec un filtre rouge est plus basse que celui de la jonction de profondeur [8].

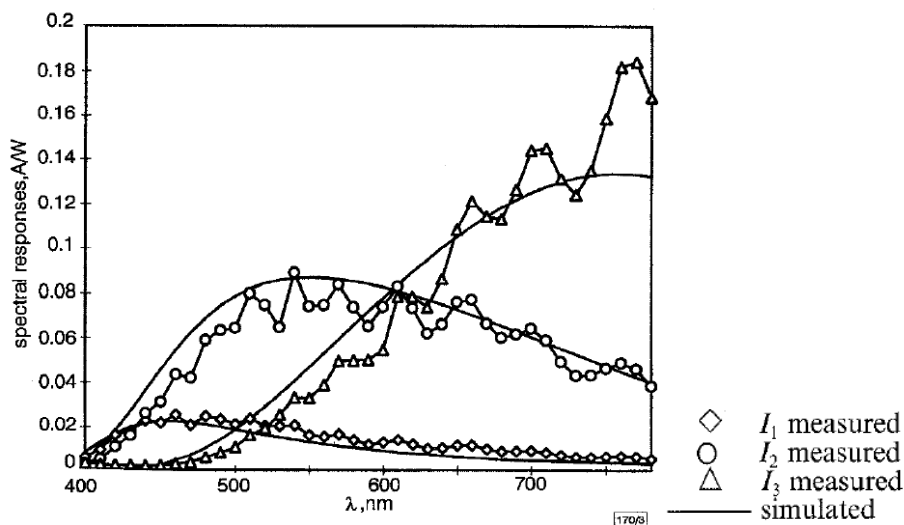


Figure II.17 Réponse spectrale de la structure BTJ (BiCMOS process) [8]

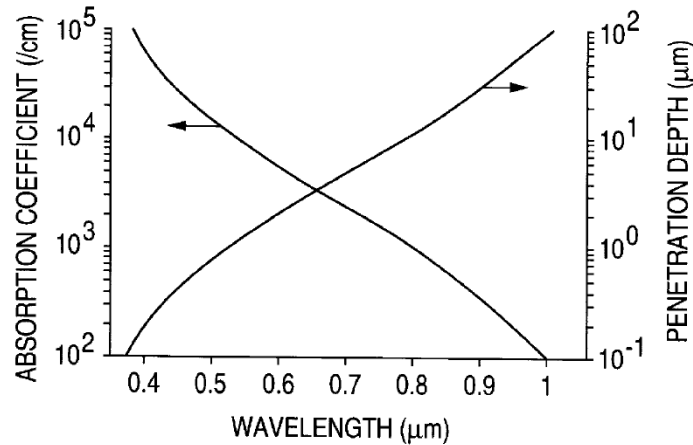


Figure II.18 Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde [13]

Il est bien connu que plus la longueur d'onde de la lumière incidente sur un substrat de silicium est grande, plus la lumière pénétrera profondément dans le silicium avant qu'elle est absorbée (Figure II.18).

La différence des profondeurs d'absorption de lumière dans le silicium (figure II.18) nous permet de réaliser un détecteur des couleurs de lumière visible; la structure à triple jonction enterrée (Figure II.19) nous permet de détecter trois couleurs :

- 1- la première jonction formée entre le p_sustrat substrat en silicium de type p (approximativement 10^{15} atome/cm²) et la région n_well de type n (approximativement 10^{16} atome/cm²) à une profondeur approximative (2 μm) d'absorption de la lumière **rouge** (575-700 nm)
- 2- la deuxième jonction formée entre la région n_well et la région diffusée p+_diff en silicium de type p (approximativement 10^{17} atome/ cm²) à une profondeur approximative (0.6 μm) d'absorption de la lumière **verte** (490-575 nm)
- 3- la troisième jonction formée entre la région p+_diff et la région diffusée n+_diff en silicium de type n (approximativement 10^{18} atome/cm²) à une profondeur approximative (0.2 μm) d'absorption de la lumière **bleu** (400-490 nm) [13]

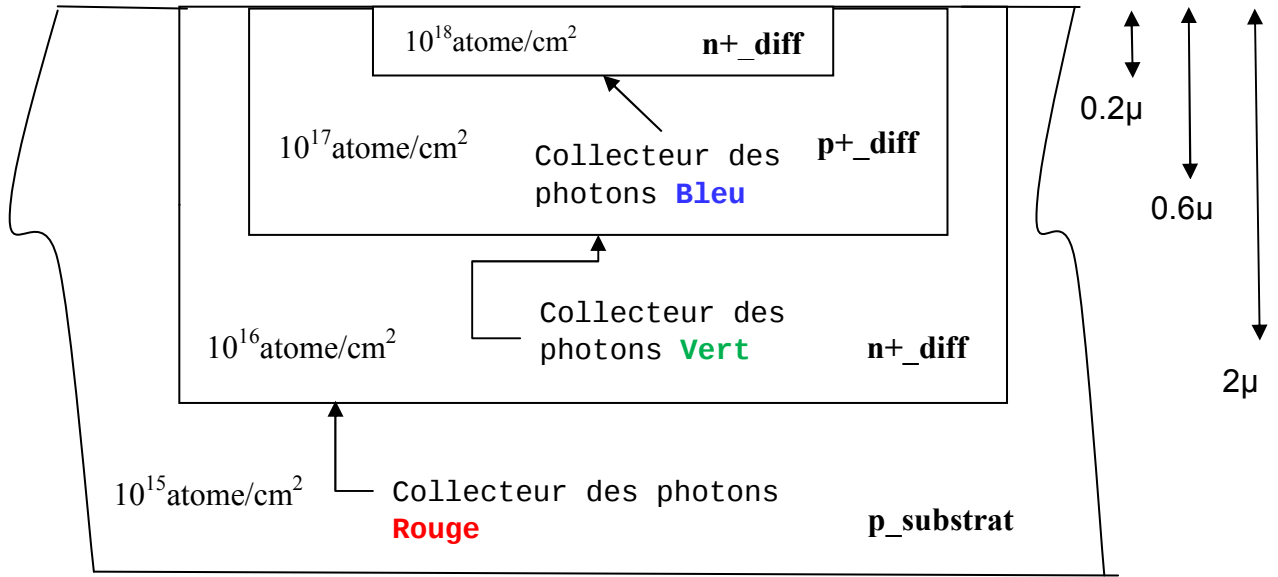


Figure II.19 Schéma coupe transversal d'un pixel du capteur trois couleur utilisant la structure BTJ [13]

II.7.3 Caractérisation colorimétrique

Pour caractériser le composant BTJ, une transformation linéaire entre l'espace de détecteur de couleur et la norme CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) a été définie en utilisant méthode des moindres carrés- et un ensemble de 1260 échantillons de couleur de livre Munsell ¹ [7] .

A partir des spectres de chaque couleur et en utilisant le Illuminant D65, nous avons calculé les coordonnées R_d , G_d , B_d fournies par le détecteur et les coordonnées R , G , B par la norme CIE. Utilisation des coordonnées R_d , G_d , B_d et R , G , B , nous avons calculé L_d^* , a_d^* , b_d^* et L^* , a^* , b^* ceux dans l'espace couleur (L^* , a^* , b^*). Les coefficients de la matrice de la transformation linéaire ont été déterminés en appliquant la méthode des moindres carrés d'ajustement de $\{(L_d^*, a_d^*, b_d^*)_i\}$ l'ensemble de coordonnées avec l'utilisation des coordonnées $\{(L^*, a^*, b^*)_i\}$ comme une cible. Selon la figure II.20 la précision colorimétrique du détecteur a été évaluée en termes de différences couleur entre les coordonnées transformé $\{(L_{dt}^*, a_{dt}^*, b_{dt}^*)_i\}$ et les $\{(L^*, a^*, b^*)_i\}$; avec cette transformation linéaire 90% des 1260 échantillons ont des différences de couleur <5 ; 76% ont des différences <3 [7].

¹ L'ATLAS "MUNSELL COLOR" est le système d'identification des couleurs le plus largement reconnu aux États-Unis.

La valeur moyenne de la couleur différences est de **2,15**; ce qui est en dessous de la valeur acceptable **3**. Ces résultats montrent que les mesures de couleur en utilisant un dispositif BTJ sont tout à fait exactes [7].

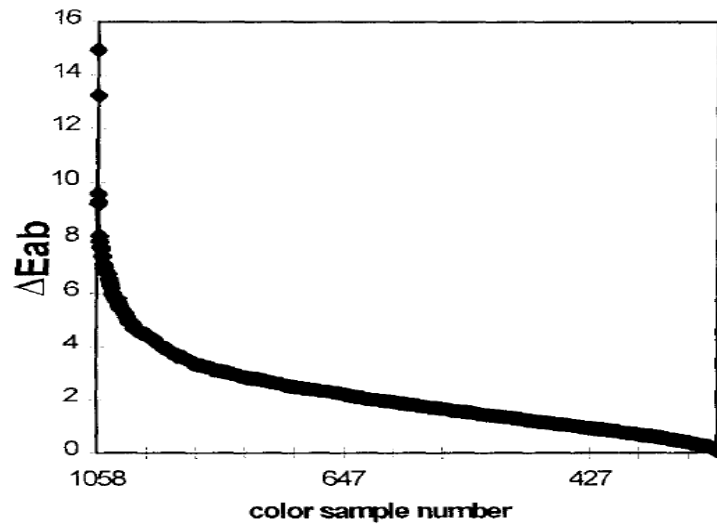


Figure II.20 Les différences de couleur dans l'espace de couleur (L^* , a^* , b^*), entre les données du détecteur et le standard 1931 CIE, obtenue avec 1260 échantillons de couleurs du livre de Munsell [7].

II.8 Conclusion

La structure à triple jonction enterrée dans un semi-conducteur permet la détection de la couleur d'un flux lumineux monochromatique (identification de la longueur d'onde); chaque jonction, à une profondeur dans le volume du silicium, a une absorption maximale pour une longueur d'onde de la lumière incidente; par conséquent chaque couleur est détectée à une jonction d'une profondeur appropriée.

CHAPITRE III

NOTIONS FONDAMENTALES SUR

LE BOND GRAPH

III.1 Historique

L'outil Bond Graph (parfois appelé «graphe à liens» ou « graphe de liaisons » imaginé par Henry M. Paynter (1923-2002), ce dernier a introduit le concept de bond graph (BG, graphe de liaisons) en 1961, du MIT Boston; le BG a été formaliser par D. Karnopp et R. Rosenberg pour donner aujourd'hui une méthodologie d'approche globale des systèmes pluri technologiques; l'outil Bond Graph se situe comme intermédiaire entre le système physique et les modèles mathématiques qui lui sont associés (matrice de transfert dans le cas linéaire, équation d'état linéaire ou non linéaire, systèmes d'équation différentielles d'ordre 2).

Il est entré en Europe à la fin des années 70, par les Pays-Bas (université de Twente) et la France (société Alsthom). Il est enseigné de façon régulière et organisée à l'École centrale de Lille, à l'université de Lyon I, à l'INSA de Lyon et de Toulouse, à l'ESE de Rennes, à l'université de Mulhouse.

A titre d'exemple, citons quelques entreprises qui l'utilisent régulièrement: EDF, Thomson, CEA, Renault, PSA, Aérospatiale, Ford, Toyota, General Motors, Alstom, Héliot, Nasa L'industrie automobile française est en pointe dans l'utilisation des bonds graphs dans leur démarche mécatronique [16].

III.2 Introduction au Bond Graph

L'outil Bond Graph est un langage graphique unifié pour tous les domaines des sciences de l'ingénieur et confirmé comme une approche structurée de la modélisation et de la simulation des systèmes pluridisciplinaires.

La modélisation d'un système technique par Bond Graph ne nécessite pas l'écriture de lois générales de conservation. Elle repose essentiellement sur la caractérisation des phénomènes d'échanges d'énergie au sein du système. Son utilisation, sur des modèles simples, peut être rapide et efficiente. Elle ne nécessite en effet que quelques « briques » pour élaborer un modèle complet, directement « dessiné » sur un logiciel adapté permettant d'obtenir des résultats directs sans avoir à écrire une seule équation, c'est le logiciel qui détermine les affiche les résultats.

La méthodologie Bond Graph n'est pas une méthode graphique supplémentaire par rapport à celles qui existent déjà, comme, par exemple, les schémas blocs, pour représenter les fonctions de transfert des systèmes. En effet, cette dernière ne s'applique qu'aux systèmes

linéaires, alors que la méthode Bond Graph concerne tous les systèmes dans tous les domaines (linéaires, non linéaires, continus, échantillonnés, numériques, électroniques, hydrauliques, mécaniques, thermiques...); la méthode Bond Graph permet de traiter les chaînes d'énergie et d'information.

Le Bond Graph est un graphe orienté, faisant apparaître des variables dynamiques, qui traduisent les transferts d'énergie entre systèmes. Il est basé sur les liens de puissance du type proposé sur la figure III-1.

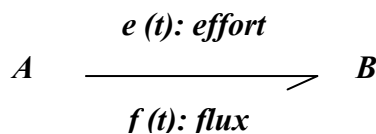


Figure III.1 Principe du Bond Graph

Les variables $e(t)$ et $f(t)$ représentent respectivement *l'effort* et le *flux* entre les systèmes A et B dont le produit $P(t) = e(t).f(t)$ n'est rien d'autre que la puissance instantanée transférée entre les systèmes A et B ; les deux variables $e(t)$ et $f(t)$ sont dites conjuguées l'une de l'autre.

L'outil Bond Graph peut répondre à certaines difficultés rencontrées, de par ses caractéristiques propres :

- C'est un langage de représentation des transferts de puissance au sein d'un système, qui suppose une approche énergétique des problèmes, donc universelle.
- Il est graphique et unifié pour tous les domaines de la physique car il est fondé sur la notion d'analogie.

III.3 Intérêts du Bond Graph

Parmi les intérêts de bond graph:

- Mise en évidence des relations de cause à effet;
- analyse des interactions (chemins et boucles causales);
- possibilités d'analyses systémique: modale (simplification de modèles) et structurelle (commandabilité, observabilité,...);
- structure les équations caractéristiques du modèle

- analyse et étude des systèmes hybride (multi-domaine) voir figure III-2

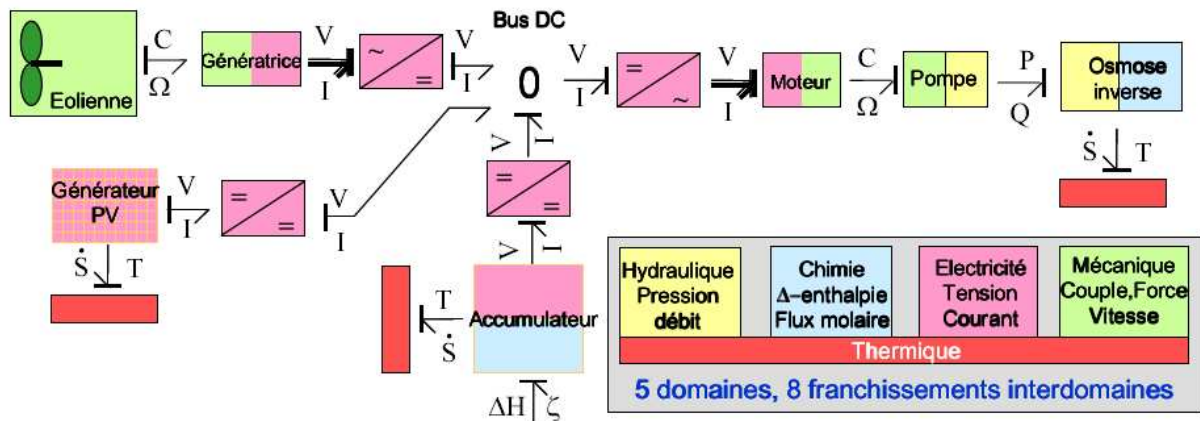


Figure III.2 Bond Graph d'un système de dessalement alimenté par un système hybride éolien, photovoltaïque [17]

III.4 Outils de simulation

Les principaux outils de simulation des Bonds Graph sont:

- 20-Sim (Université de Twente, Pays Bas)
- Camp-G, MS1, symbol2000, PACTE
- Mathematica toolbox, ...

Certains logiciels de simulation de systèmes admettent en entrée le modèle Bond Graph, construit à l'aide d'un éditeur graphique (ENPORT, MS1, 20-sim, ARCHER, CAMPG...). Le logiciel de simulation Matlab-Simulink permet d'entrer le modèle sous forme de schéma-bloc, qui peut être déduit directement du modèle Bond Graph; le passage du Bond Graph au schéma-bloc s'obtient par « décomposition » du lien de puissance en lien d'information (Figure III.3).

L'implémentation du Bond Graph dans un logiciel (20-sim, Camp-G, SYMBOLS-2000, MS1...) permet de tracer les courbes des variables du processus, obtenir les équations du système, voir les flux d'énergie. Il est également assez facile d'en déduire le schéma bloc dans le domaine linéaire.

III.5 Notions fondamentales

Avant d'exploiter notre Bond Graph, il est nécessaire de rappeler les notions de variable d'état (Tableau III.1) «variables de puissance et d'énergie» et de causalité, qui sont essentielles dans la méthode Bond Graph.

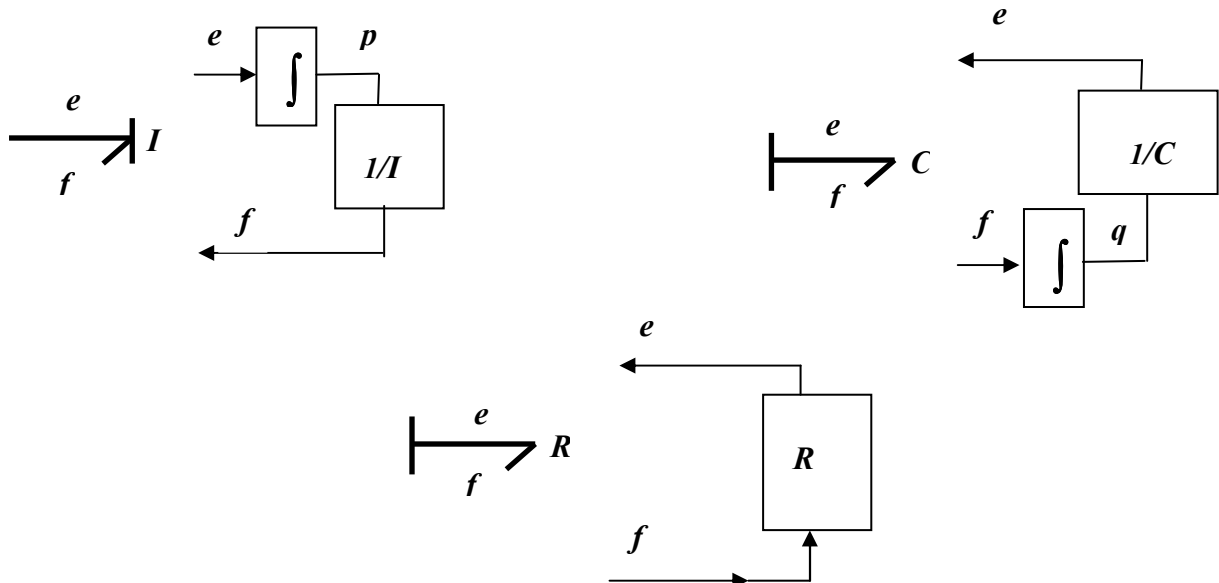


Figure III.3 Schémas bloc des éléments I, C et R [18]

III.5.1 Variables de puissance

La puissance échangée s'exprime comme le produit de deux variables complémentaires e « effort: e » (v ou T ou F ou P) et f « flux: f » (i ou q_s ou V ou q_v) (voir tableau III.1); $P=e.f$ (Tableau III.1). D'un point de vue général, indépendamment du domaine considéré, ces variables sont appelées « variables généralisées » d'effort et de flux, notées respectivement e et f .

Dans tout système physique constitué de 2 sous systèmes A , B ; il y a conservation de l'énergie et continuité de la puissance (Figure III.4)

III.5.2 Variables d'énergie

L'état d'un système correspond à l'ensemble des informations nécessaires sur celui-ci pour déterminer son évolution à partir des seules entrées extérieures. Les variables qui représentent ces informations s'appellent variables d'état. Elles sont liées aux éléments I (énergie cinétique) et C (énergie potentielle) du Bond Graph.

Le Bond Graph représente les transferts d'énergie. Les variables qui interviennent dans ces transferts sont les efforts $e(t)$ (au sens large : pression, couple, tension...) et les flux $f(t)$ (au sens large : vitesse, intensité, débit...).

L'énergie stockée se calcule comme l'intégrale de la puissance par rapport au temps :

$$E(t) = \int_0^t e(\theta).f(\theta).d\theta + E(0) \dots\dots\dots (III.1)$$

ce qui peut aussi s'exprimer différemment suivant le type d'élément I ou C concerné.

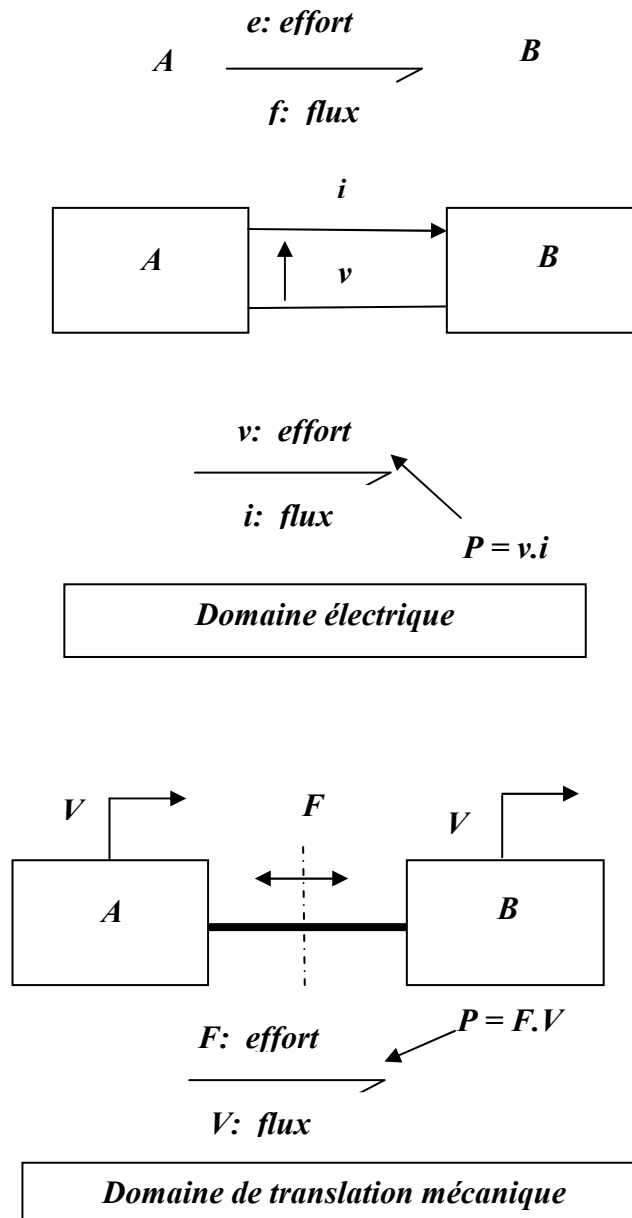


Figure III.4 Echange de puissance entre les systèmes A et B [17]

III.5.2.1 Énergie stockée dans un élément C

La loi caractéristique de l'élément C s'écrit dans le cas général [19]:

$$e = \psi_C \left(\int f dt \right) = \psi_C(q) \quad (\text{III.2})$$

De plus, par définition de la variable q

$$f \cdot dt = dq \quad (\text{III.3})$$

Ces deux relations conduisent à écrire l'énergie sous la forme:

$$E(q) = \int_{q_0}^{q_t} e(q) \cdot dq + E(q_0) \quad (\text{III.4})$$

Ce qui correspond à l'énergie potentielle stockée dans un ressort ou l'énergie électrique stockée dans un condensateur (Figure III.5).

Electricité	Mécanique	Hydraulique
		
$i = C \cdot \frac{dv}{dt}$	$V = \frac{1}{K} \cdot \frac{dF}{dt}$	$Q = C \cdot \frac{dP}{dt}$

Figure III.5 Analogie physique [17]

III.5.2.2 Énergie stockée dans un élément I

La loi caractéristique de l'élément I s'écrit [19]:

$$f = \psi_I \left(\int e dt \right) = \psi_I(p) \quad (\text{III.5})$$

De plus, par définition de la variable p

$$e \cdot dt = dp \quad (\text{III.6})$$

Ces deux relations conduisent à écrire l'énergie sous la forme:

$$E(p) = \int_{p_0}^{p_t} f(p) \cdot dp + E(p_0) \quad (\text{III.7})$$

Ce qui correspond à l'énergie cinétique stockée dans une masse ou l'énergie magnétique stockée dans une bobine.

III.5.3 Moment généralisé et déplacement généralisé

La puissance instantanée vaut:

$$P(t) = e(t) \cdot f(t) \quad (\text{III.8})$$

Les variables qui caractérisent l'énergie sont les intégrales premières temporelles des efforts et des flux. On a:

Moment généralisé:

$$p(t) = p_0 + \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau \quad (\text{III.9})$$

Déplacement généralisé:

$$q(t) = q_0 + \int_0^t f(\tau) \cdot d\tau \quad (\text{III.10})$$

L'énergie est calculée par intégration de la puissance par rapport au temps:

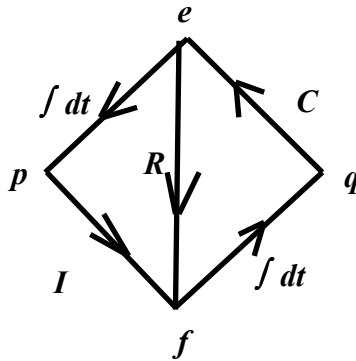
$$E(t) = \int_0^t P(\theta) \cdot d\theta + E(0) \quad (\text{III.11})$$

On définit les variables d'énergie par les relations intégrales suivantes:

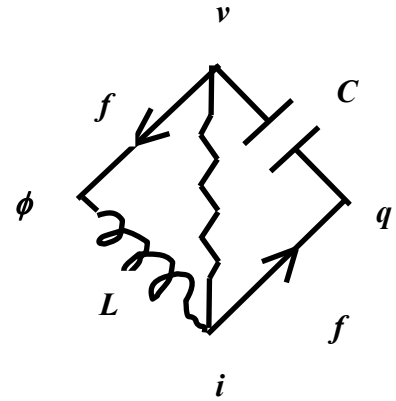
$$p(t) = \int_0^t e(\theta) \cdot d\theta + p(0) \quad (\text{III.12})$$

$$q(t) = \int_0^t f(\theta) \cdot d\theta + q(0) \quad (\text{III.13})$$

$p(t)$ est le moment généralisé et $q(t)$ est le déplacement généralisé (Figure III.6).



$$\begin{aligned} P &= e \cdot f = v \cdot i \\ E &= p \cdot q = \phi \cdot \psi \\ &= \int_0^t e(\tau) \cdot f(\tau) \cdot d\tau \end{aligned}$$



Variables généralisées

Variables électriques

Figure III.6 Tétraèdre de Paynter ¹ [17]

¹ H. Paynter, (1923-2002)

Le tableau III.1 donne les variables de puissance et d'énergie des domaines classiques des sciences de l'ingénieur. Les variables d'état sont généralement liées aux éléments de stockage d'énergie; ce sont les moments et les déplacements généralisés ci-dessus. Dans ce tableau est indiquée la signification de ces variables généralisées pour les principaux domaines de la physique.

III.6 Les éléments de base de bond graph

Les éléments de base de la méthode Bond Graph sont au nombre de neuf [16], que l'on peut classer en quatre groupes (Tableau III.2):

- 2 éléments actifs (fournissent de la puissance): source d'effort « Se » et source de flux « Sf ».
- 3 éléments passifs (reçoivent la puissance): stockage d'énergie potentielle « C »; stockage d'énergie cinétique « I »; dissipation d'énergie « R ».
- 4 éléments de jonction (conservent la puissance): même effort « θ »; même flux « I »; transformateur « TF »; gyrateur « GY ».
- Éléments détecteurs
- Éléments modulés; certains éléments peuvent être modulés par une information: MSe , MSf , MTF et MGY .

III.6.1 Éléments actifs

Les sources d'effort Se et de flux Sf sont dites éléments actifs car elles contribuent à fournir de la puissance au système. Ainsi, un générateur de tension, modélisé par Se : v , applique une tension v aux bornes du circuit électrique auquel il est connecté, ce qui entraîne la circulation d'un courant i ; le produit $P=v.i$ est la puissance instantanée fournie par la source de tension au circuit; l'orientation de la demi-flèche est fixée, et supposée sortant de la source.

Remarque: les sources Se et Sf sont exclusive l'une de l'autre, on peut imposer soit l'effort soit le flux, mais pas les deux à la fois [16].

III.6.2 Éléments passifs

Les éléments R , C , I sont dits éléments passifs car ils transforment la puissance qui leur est fournie en énergie dissipée (élément R) ou stockée (éléments I et C). Ils sont caractérisés par une loi scalaire, et reçoivent la puissance par un lien unique.

L'élément **R** est utilisé pour modéliser tout phénomène physique liant la variable d'effort **e** à la variable de flux **f**, il est dissipatif d'énergie et la puissance qui lui est transmise est transformée en chaleur (considérée ici comme dissipée).

L'élément **C** est utilisé pour modéliser tout phénomène physique liant la variable d'effort **e** à la variable de déplacement **q**, l'élément **I** pour modéliser tout phénomène physique liant la variable de flux **f** à la variable de moment **p**. Ces deux éléments transforment la puissance qui leur est fournie en énergie stockée. La puissance est fournie aux éléments, la demi-flèche est orientée vers l'élément.

Le tétraèdre de Paynter (figure III.7) regroupe les 4 variables généralisées et les 3 éléments passifs.

Domaine	Effort e	Flux f	Moment généralisé p	Déplacement généralisé q
Electrique	Tension v (V)	Courant i (A)	Flux magnétique λ (Wb)	Charge q
Mécanique translation	force F (N)	Vitesse V (m/s)	Quantité de mouvement p	Déplacement x (m)
Mécanique rotation	Couple C (N.m)	Vitesse angulaire ω (Rd/s)	Moment cinétique σ	Angle θ (Rd)
Hydraulique et pneumatique	Pression P (N/m ²)	Débit volumique q_v (m ³ /s)	Impulsion pression Γ	Volume V (m ³)
Magnétique	Force magnétomotrice	Dérivée flux magnétique		Flux magnétique (Wb)
Chimique	Potentiel chimique μ	Flux molaire q_m		Nombre de moles N
Thermo-dynamique	Température T	Flux entropique q_s		Entropie S
Acoustique	Pression (N/m ²)	Vitesse vol.(m ³ /s)	Impulsion	Volume (m ³)

Tableau III.1: Signification des variables généralisées pour différents domaines physiques [16]

Elément	Symbole	Loi générique	Exemple
Eléments actifs	$Se \longrightarrow$	e indépendant de f	Pesanteur, générateur de tension
	$Sf \longrightarrow$	f indépendant de e	Pompe, générateur de courant
Eléments passifs	$\longrightarrow R$	$\phi_R(e, f) = 0$	Amortisseur, frottement, résistance électrique, restriction hydraulique ($e=f \cdot R$, Elec. $v=i \cdot R$)
	$\longrightarrow C$	$\phi_C(e, q) = 0$	Ressort, élasticité, réservoir, condensateur ($q=e \cdot C$, Elec. $q=v \cdot C$)
	$\longrightarrow I$	$\phi_I(p, f) = 0$	Masse, inertie, bobine ($p=f \cdot I$, Elec. $p=i \cdot L$)
Détecteurs	$\longrightarrow De$		Voltmètre, manomètre
	$\longrightarrow Df$		Ampèremètre, débitmètre, tachymètre

Tableau III.2 Eléments actifs, passifs et détecteurs [19]

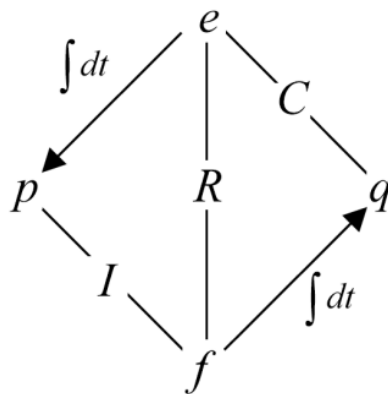


Figure III.7 Le tétraèdre de Paynter [19]

III.6.3 Éléments de jonction

Les éléments de jonction, notés θ , I , TF , GY , servent à coupler les éléments R , C , I et les sources et composent la structure de jonction correspondant à l'architecture du système étudié; ils sont conservatifs de puissance. L'élément transformateur TF est associé à un transfert d'énergie couplant les efforts entre eux dans un certain rapport et les flux entre eux dans le rapport inverse. L'élément gyrateur GY , quant à lui, assure une transduction de l'énergie en couplant de façon croisée les efforts et les flux

Le tableau III.3 regroupe ces différents éléments, avec les lois qui les caractérisent, et leur interprétation dans quelques domaines physiques. Les coefficients a_i valent $+1$ ou -1 suivant que la demi-flèche entre dans ou sort de la jonction.

III.6.4 Éléments détecteurs

Les détecteurs De et Df sont des éléments supposés idéaux (qui ne consomment pas de puissance) placés dans le modèle Bond Graph pour indiquer la présence d'un capteur ou d'un instrument de mesure. Aucune puissance n'intervient, on utilisera donc un lien d'information classique, ou signal, représenté par une flèche entière classique.

Dans le tableau III.2 sont regroupés ces éléments et quelques exemples de phénomènes élémentaires ou de composants physiques correspondants.

III.6.5 Procédure de construction du BG

Pour établir ce Bond Graph, nous allons indiquer une procédure systématique de construction d'un Bond Graph.

III.6.5.1 La procédure

Les étapes 1 et 2 concernent l'identification des domaines physique et des éléments [16]:

- 1- Déterminer les domaines physiques du système étudié et rechercher tous les éléments de base: C , I , R , Se , Sf , TF et GY . Donner à chaque élément un nom distinct.
 - 2- Introduire une valeur de référence pour les efforts, les flux dans chacun des domaines.
- Les étapes 3 à 6 décrivent la génération des connexions de la structure:
- 3- Identifier tous les autres efforts (flux) et leur attribuer un nom propre.
 - 4- Tracer pour ces efforts (ces flux) des θ -jonctions (des I -jonctions).

5- Rechercher toutes les différences entre efforts (entre flux) nécessaires pour relier les ports de tous les éléments déterminés à l'étape 1. Leur donner un nom unique marquant cette différence (exemple: e_{12} pour une différence entre l'effort e_1 et l'effort e_2)

6- Construire les différences entre efforts en utilisant une I -jonction (une θ -jonction pour les différences entre flux)

Les éléments peuvent être maintenant connectés:

7- Relier les ports de tous les éléments trouvés à l'étape 1 avec des θ -jonctions des efforts correspondants et des différences entre efforts (I -jonctions des flux ou des différences entre flux)

8- Simplifier le graph obtenu en appliquant les règles de simplification.

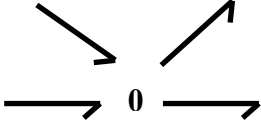
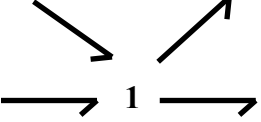
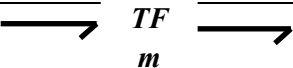
Elément	symbole	Loi générique	Exemples
Eléments de jonction (conservatifs de puissance)		$e_1 = e_2 = \dots = e_n$ $\sum a_i \cdot f_i = 0$ Effort commun, somme des flux est nul. Comme dans la liaison parallèle dans le réseau électrique	Couplage série en mécanique, parallèle en électrique et hydraulique
		$f_1 = f_2 = \dots = f_n$ $\sum a_i \cdot e_i = 0$ Flux commun, somme des efforts est nul. Comme dans la liaison série dans le réseau électrique	Couplage parallèle en mécanique, série en électrique et hydraulique
	 Transforme l'effort d'un domaine à un autre domaine Exemple (tension → couple)	$e_1 = m \cdot e_2$ $f_2 = m \cdot f_1$	Levier, poulies, engrenages, transformateur électrique, couplage système physiques
	 Transforme l'effort d'un domaine à un flux d'un autre domaine Exemple (tension → vitesse rotation)	$e_1 = r \cdot f_2$ $e_2 = r \cdot f_1$	Moteur courant continu, capteur effet Hall, couplage systèmes physiques

Tableau III.3 Eléments de jonction [19]

III.6.5.2 Exemple du Bond Graph d'un motoréducteur

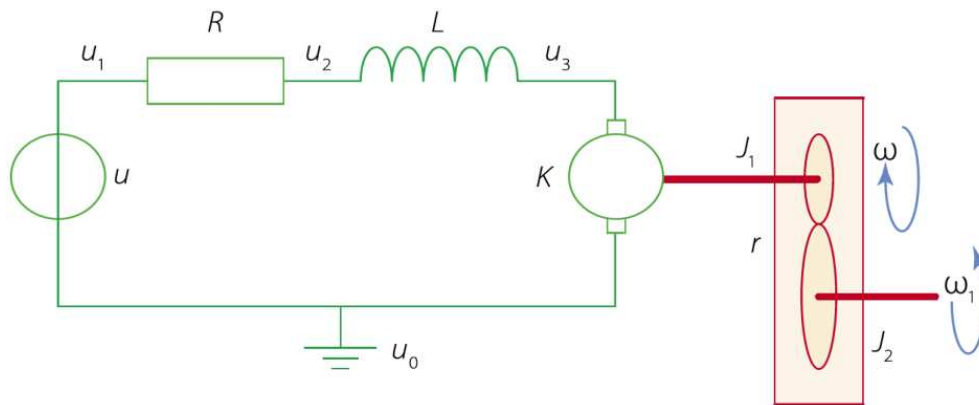


Figure III.8 Le modèle électromécanique du motoréducteur [16]

Sur la figure III.9, nous trouvons le tracé classique du modèle électrique d'un motoréducteur. Nous pouvons dénombrer :

- une source d'effort u ;
- quatre éléments de dissipation ou de stockage, R de type résistif et L , J_1 , J_2 de type inertiel;
- un gyrateur de constante K qui transforme la force électromotrice en vitesse de rotation de l'arbre d'entrée du réducteur (équation $e = K.\omega$);
- un transformateur (le réducteur) tel que $\omega_1 = r.\omega$.

Nous pouvons construire le bond graph du motoréducteur en appliquant la procédure de construction de bond graph.

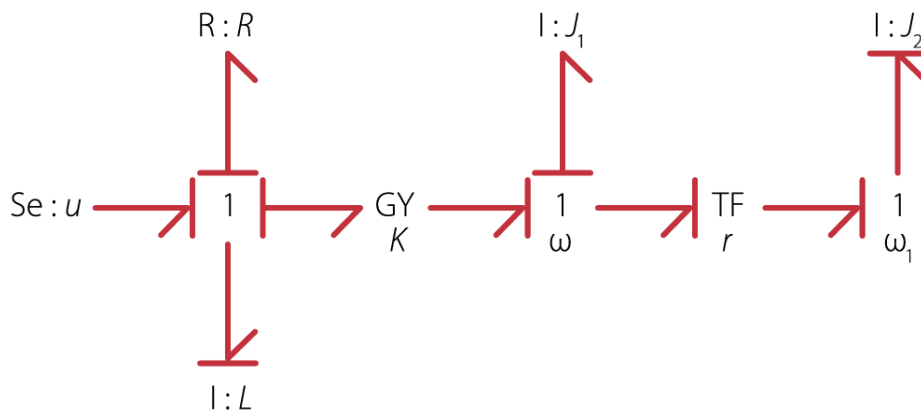


Figure III.9 Le modèle Bond Graph du Motoréducteur [16]

III.7 Causalité

III.7.1. Notion de causalité

Un modèle Bond Graph représente l'architecture du système et la façon dont la puissance s'échange entre les éléments. Il permet aussi de faire apparaître explicitement les relations de cause à effet et la structure de calcul des équations caractéristiques associées au modèle.

La causalité doit être indiquée sur un Bond Graph afin que celui-ci soit traité de façon numérique; c'est d'ailleurs le logiciel qui s'en charge. On rappelle que la causalité consiste à imposer un ordre de cause à effet dans les relations entre les variables représentant un système. Sur un Bond Graph, la causalité est marquée par un trait perpendiculaire au lien Bond Graph à l'une des extrémités de celui-ci (figure III.10) [16]. Par convention, on impose l'effort du côté du trait de causalité; le flux est donc imposé de l'autre côté du lien.



Figure III.10 La causalité [16]

Comme en informatique, on peut utiliser le signe « $:=$ » pour indiquer la causalité. Par exemple, « $a := b$ » signifie que a est déterminé après l'évaluation de b . On peut maintenant écrire les équations causales pour la figure III.10 :

Pour la partie gauche, $A.e := B.e$ et $B.f = A.f$

Pour la partie droite, $B.e := A.e$ et $A.f = B.f$

III.7.2 La procédure d'affectation de la causalité

De même qu'il existe une procédure pour tracer un Bond Graph, il en existe une pour déterminer la causalité sur un Bond Graph [16]:

- 1- Affecter les causalités imposées par les éléments sources d'effort et de flux et les propager aussi loin que possible en prenant en compte les contraintes imposées par les transformateurs, gyrateurs, θ -jonctions et I -jonctions.
- 2- Affecter la causalité intégrale (de préférence) aux éléments de stockage I et C et la propager dans le bond graph.
- 3- Affecter une causalité arbitraire aux éléments dissipatifs R et la propager dans le bond graph.
- 4- Si le bond graph n'est pas complet d'un point de vue causal, affecter une causalité arbitraire aux éléments non traités et la propager au sein du bond graph.
- 5- Si, lors des étapes 2 à 4, il existe un conflit, il faut alors utiliser une causalité différentielle pour les éléments C et I de manière à lever le conflit [18].

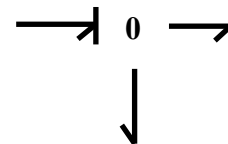
III.7.3 Règles d'affectation de la causalité

L'affectation de la causalité n'est pas arbitraire, mais soumise à des règles regroupées dans les tableaux III.4 et III.5 [19]. Il apparaît que les lois caractéristiques des éléments I et C peuvent s'écrire sous deux formes, soit intégrale, soit dérivée.

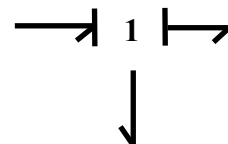
Règle: pour obtenir le modèle d'état associé à un modèle Bond Graph, affecter préférentiellement une causalité intégrale aux éléments I et C .

III.7.4 Contrainte de causalité

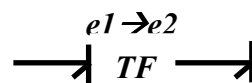
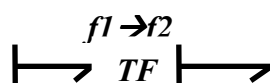
Effort commun, un seul effort peut être imposé



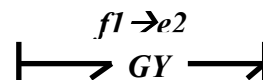
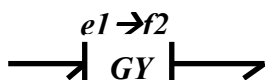
Flux commun, N-1 efforts est imposé



Transformateur TF , même causalité en entre et sortie



Gyrateur GR , causalité commutée



Note : La position du trait causal est indépendante du sens de la demi-flèche.

Causalité	Symbole	Loi
Obligatoire	$Se \rightarrow$	e imposé par Se
	$Sf \rightarrow$	f imposé par Sf
intégrale	$\rightarrow C$	$e = \psi_C \left(\int f(t) \cdot dt \right)$
	$\rightarrow I$	$f = \psi_I \left(\int e(t) \cdot dt \right)$
dérivé	$\rightarrow C$	$f = \frac{d}{dt} \left(\psi_C^{-1} (e) \right)$
	$\rightarrow I$	$e = \frac{d}{dt} \left(\psi_I^{-1} (f) \right)$
Arbitraire (linéaire)	$\rightarrow R$	$e = R \cdot f$
	$\rightarrow R$	$f = (1/R) \cdot e$
Non arbitraire (non linéaire)	$\rightarrow R$	$e = \psi_R(f)$
	$\rightarrow R$	$f = \psi_R^{-1} (e)$

Tableau III.4 Règles d'affectation de la causalité

sur les sources et les éléments passifs [19]

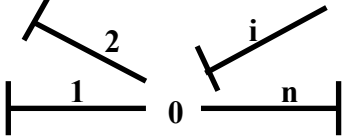
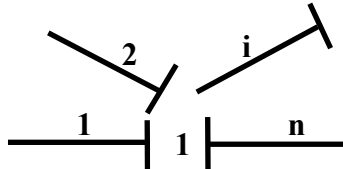
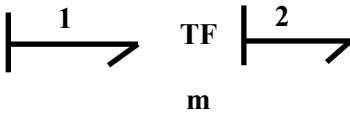
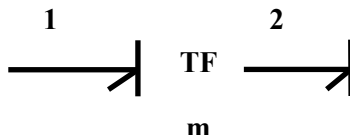
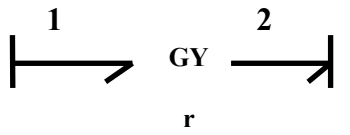
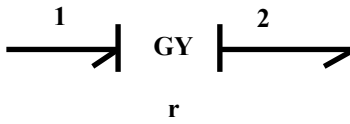
Causalité	Symbole	Loi
Restrictions de causalité		$e_1 = e_i$ $e_2 = e_i$ $e_n = e_i$ $a_i f_i = a_1 f_1 - a_2 f_2 - \dots - a_n f_n$
		$f_1 = f_i$ $f_2 = f_i$ $f_n = f_i$ $a_i e_i = a_1 e_1 - a_2 e_2 - \dots - a_n e_n$
		$e_1 = m e_2$ $f_2 = m f_1$
		$e_2 = (1/m) e_1$ $f_1 = (1/m) f_2$
		$e_1 = r f_2$ $e_2 = r f_1$
		$f_1 = (1/r) e_2$ $f_2 = (1/r) e_1$

Tableau III.5 Règles d'affectation de la causalité sur les éléments de jonction [19]

III.8 Conclusion

Le Bond Graph est un outil utilisé pour étudier les systèmes hybrides (électrique, optique, mécanique, hydraulique...). Il permet l'étude et la modélisation du comportement des systèmes en se basant sur le principe de transfert de puissance. L'objectif de notre étude est d'utiliser cet outil à la modélisation comportementale du capteur optique BTJ.

CHAPITRE IV

MODELISATION COMPORTEMENTALE DU CAPTEUR OPTIQUE BTJ EN UTILISANT LE BOND GRAPH

IV.1 Introduction

Dans le but d'étudier le capteur optique BDJ, nous avons utilisé un circuit électrique équivalent du capteur optique BDJ, ce circuit équivalent a été proposé dans plusieurs références [1, 4]; il est utilisé pour les petits signaux ce qui implique de faible variation de l'intensité du rayonnement appliqué sur la surface du capteur. Il est généralement employé pour décrire le comportement dynamique du dispositif dû à une perturbation d'amplitude infinitésimale, qui ne déplace pas le point de fonctionnement [1].

IV.2 Modélisation analytique du capteur optique BDJ

Généralement, un APS (Active-Pixel Sensor) peut être définie comme un photo-détecteur simple (photodiode ou Photo-MOS) associé à certains transistors CMOS (généralement entre deux et cinq) afin de fournir l'amplification et la lecture intra-pixel. Lorsqu'il est appliqué au photo-détecteur BDJ, une configuration typique est montrée dans la figure IV.1 [14].

Le photo-détecteur, qui est fabriqué dans un processus CMOS standard, se compose de deux jonctions PN enterrées et empilées verticalement, ils fournissent aux sorties deux courants I_1 et I_3 (figure IV.2) [14] tels que:

$$I_1 = I_{ph1} + I_{dc1} \quad (IV.1)$$

$$I_3 = I_{ph2} + I_{dc2} \quad (IV.2)$$

$$I_2 = I_{ph1} + I_{dc1} + I_{ph2} + I_{dc2} = I_1 + I_3 \quad (IV.3)$$

Où : I_{ph1} et I_{ph2} : représentent les photo-courants traversant la jonction 1 et 2

I_{dc1} et I_{dc2} : les courants d'obscurité traversant la jonction 1 et 2

I_1 , I_2 et I_3 : les courants à l'extérieur du capteur BDJ

Ainsi, deux réponses spectrales sont disponibles à partir du même pixel, en forme passe-bande centrées sur deux longueurs d'onde différentes (Figure IV.3.). Par ailleurs, comme il est représenté sur la Figure IV.4, le rapport du courant de sortie I_3/I_1 montre une fonction monotone croissante avec la longueur d'onde λ .

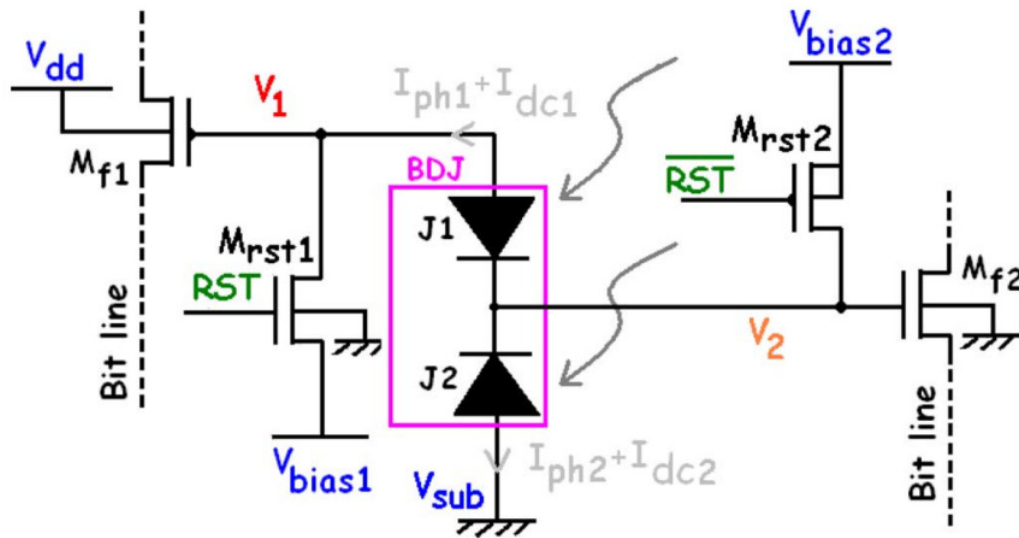


Figure IV.1 CMOS BDJ APS [14]

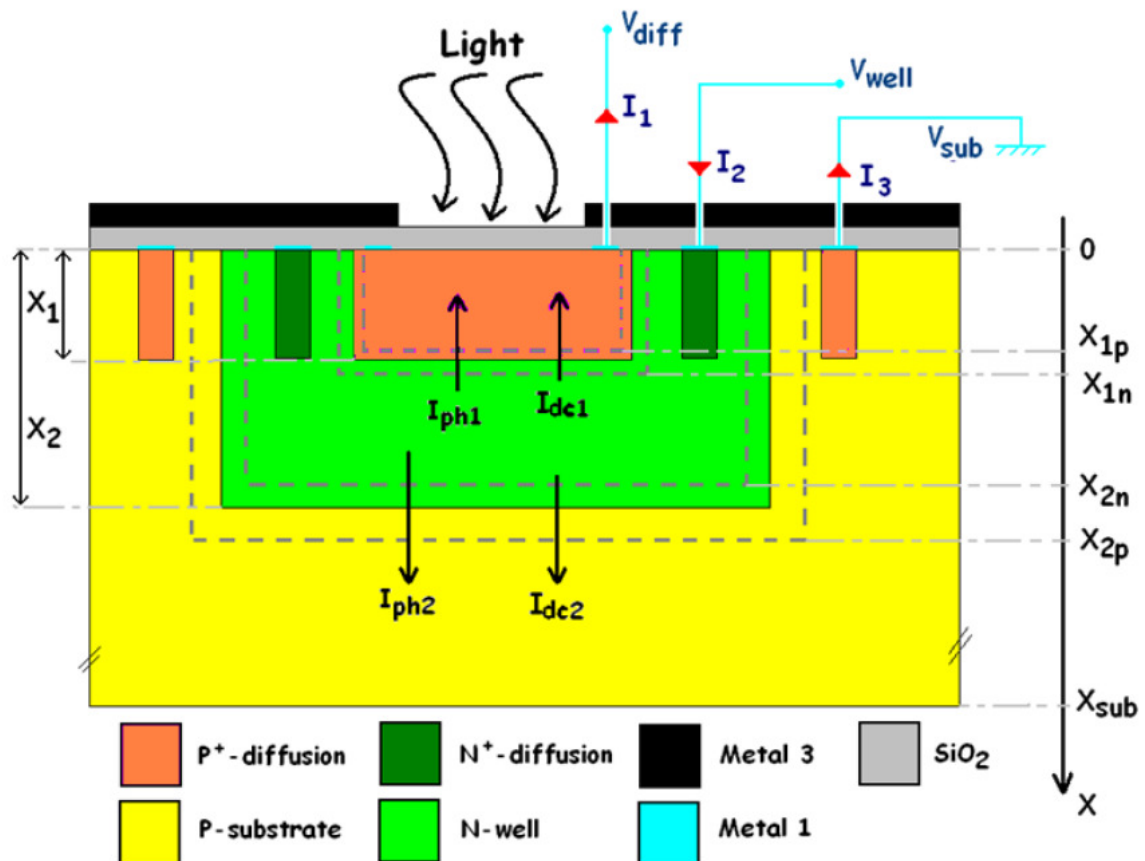


Figure IV.2 Coupe transversale du capteur optique BDJ [1, 14]

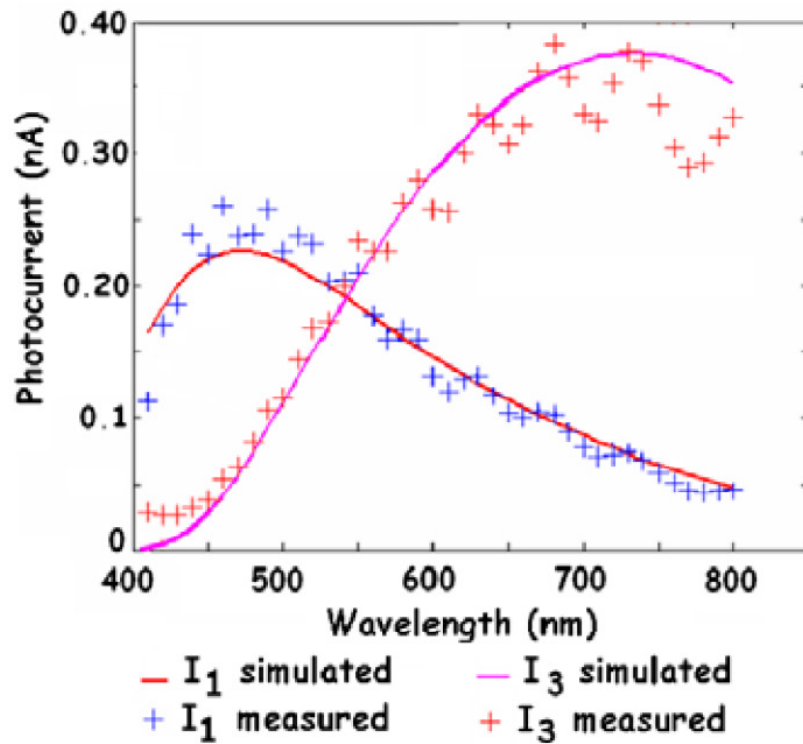


Figure IV.3 Réponses spectrales des photo-courants du capteur optique BDJ [1, 14]

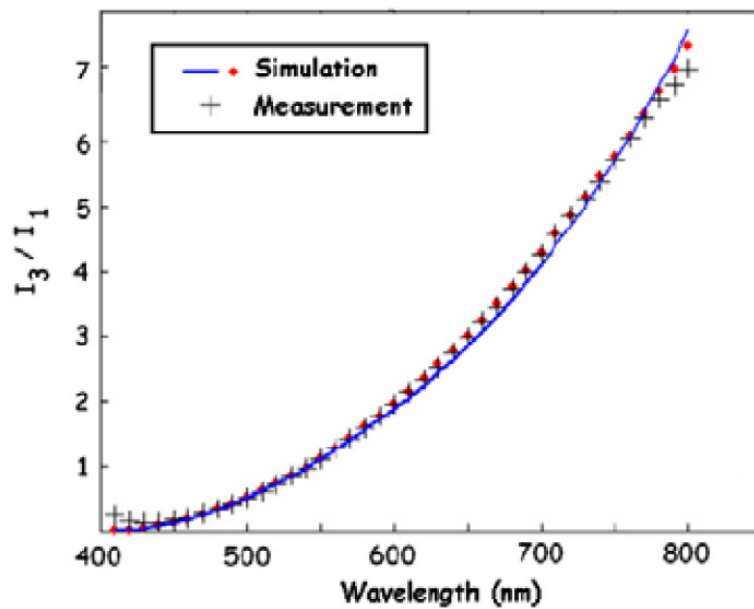


Figure IV.4 Ratio des photo-courants (I_3/I_1) en fonction de la longueur d'onde dans le capteur optique BDJ [1, 14]

Pour l'obtention du modèle mathématique pour les courants I_1 et I_3 nous avons fait une interpolation polynomiale du huitième degré avec les valeurs mesurées de I_1 et I_3 d'après les courbes de la figure IV.3

Après l'interpolation de ces mesures on a obtenu les deux polynômes pour les deux courants I_1 et I_3 (voir tableau IV.1):

$$I_1 = A_1 * \lambda^8 + B_1 * \lambda^7 + C_1 * \lambda^6 + D_1 * \lambda^5 + E_1 * \lambda^4 + F_1 * \lambda^3 + G_1 * \lambda^2 + H_1 * \lambda + I_1$$

$$I_3 = A_3 * \lambda^8 + B_3 * \lambda^7 + C_3 * \lambda^6 + D_3 * \lambda^5 + E_3 * \lambda^4 + F_3 * \lambda^3 + G_3 * \lambda^2 + H_3 * \lambda + I_3$$

Coefficients du polynôme de I_1			Coefficients du polynôme de I_3	
A₁	-4,72530126914690e-20		A₃	5,47986570681036e-20
B₁	2,38473011443842e-16		B₃	-2,20185169990110e-16
C₁	-5,21772507821939e-13		C₃	3,72784225241745e-13
D₁	6,46904263085691e-10		D₃	-3,43278413910077e-10
E₁	-4,97541971436678e-07		E₃	1,84175938132602e-07
F₁	0,000243365798281820		F₃	-5,64662292454666e-05
G₁	-0,0740382249232646		G₃	0,00857149492244656
H₁	12,8292901649899		H₃	-0,272472938950796
I₁	-970,794857789135		I₃	-50,4213795917058

Tableau IV.1 Coefficients des polynômes des courants I_1 , I_3

Les courbes (de I_1 , I_3 et I_3/I_1) obtenues des expressions de ces deux polynômes sont représentées dans les figures IV.5 et IV.6.

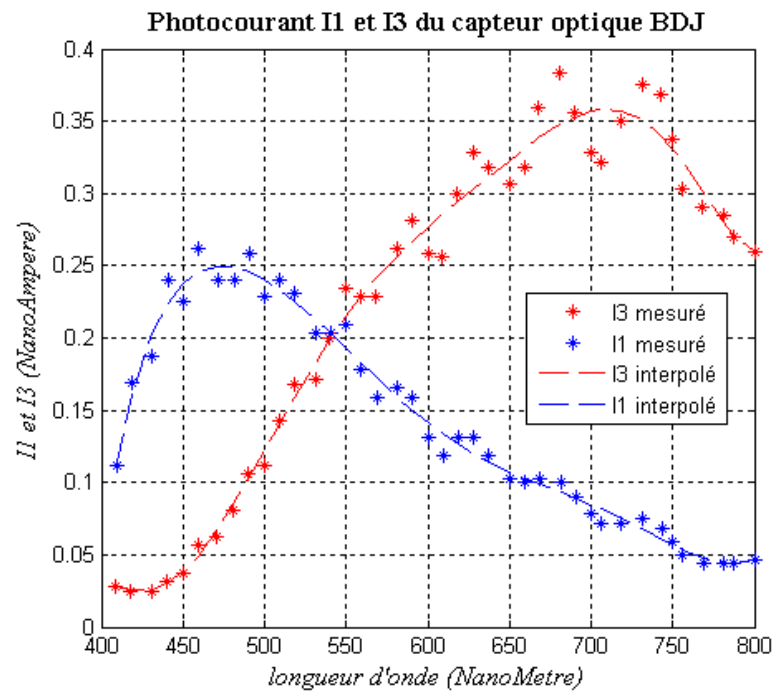


Figure IV.5 Photo-courants I_1 et I_3 mesurés et interpolés
(Tracés avec Matlab)

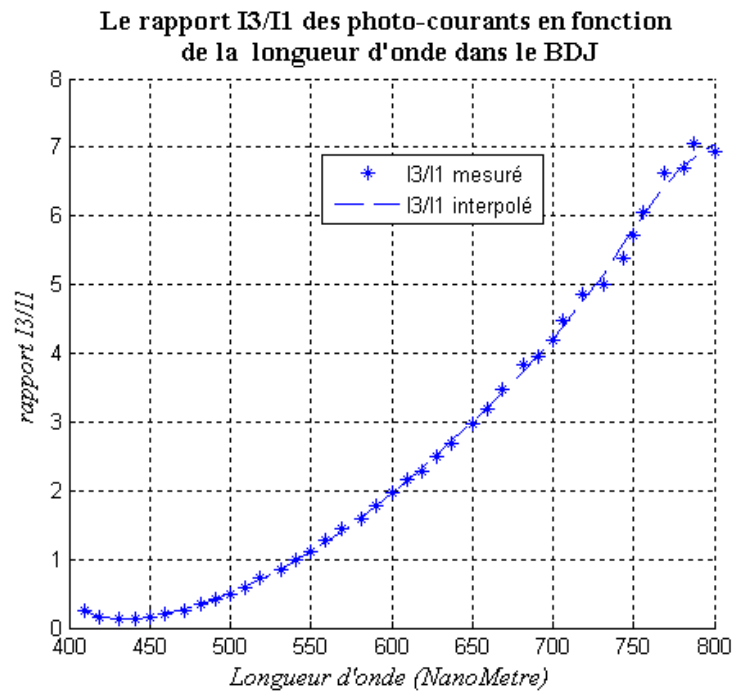


Figure IV.6 Ratio du photo-courant (I_3/I_1) en fonction de la longueur d'onde dans le BDJ (Tracé avec Matlab)

IV.3 Modélisation avec Bond Graph du capteur optique BDJ

Un circuit équivalent pour petit signaux qui a été proposé [1, 4, 20], de la structure du capteur BDJ (Figure IV.2), est schématisé sur la figure IV.7

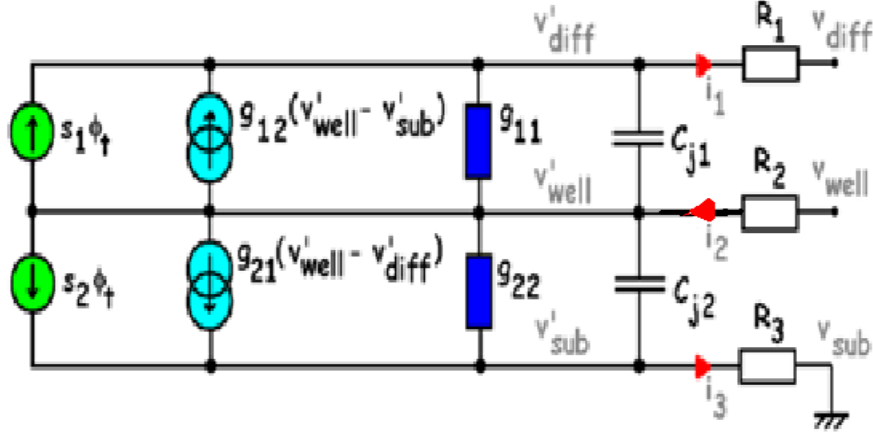


Figure IV.7 Circuit électrique équivalent du capteur optique BDJ pour petit signaux [1, 4, 20]

Les expressions des trois courants I_1 , I_2 , I_3 (figure IV.2) sont données comme suite [3,7]:

$$\begin{cases} I_1 = g_{11} \cdot (v'_{well} - v'_{diff}) + g_{12} \cdot (v'_{well} - v'_{diff}) + s_1 \cdot \phi_t \\ I_2 = I_1 + I_3 \\ I_3 = g_{21} \cdot (v'_{well} - v'_{diff}) + g_{22} \cdot (v'_{well} - v'_{diff}) + s_2 \cdot \phi_t \end{cases} \quad (IV.4)$$

Avec:

g_{11}, g_{22} : les conductances dynamiques

g_{12}, g_{21} : les transductances

s_1, s_2 : les sensibilités spectrales

Pour établir le modèle Bond Graph de ce circuit équivalent, on applique la méthode de construction de Bond Graph (voir procédure de construction du Bond Graph dans le chapitre III); avec un suivi minutieux de transfert de puissance et étude de causalité pour

chaque élément, nous avons obtenu le modèle Bond Graph de la figure IV.8.

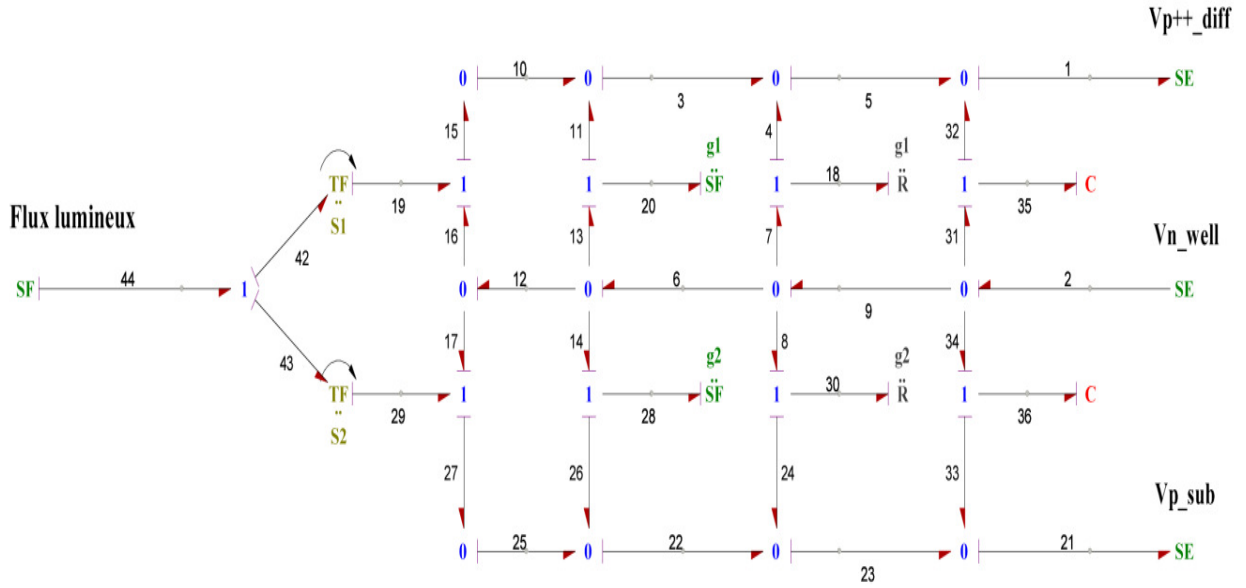


Figure IV.8 Modèle Bond Graph du capteur optique BDJ
(Tracé avec le logiciel SYMBOLS-2000)

On applique un flux lumineux ϕ_0 (figure IV-9), dont l'expression est donnée par l'équation IV.5 [12], sur les deux jonctions avec les sensibilités S_1 et S_2 (figure IV.10).

$$\phi_0 (s^{-1} \cdot cm^{-2}) = \frac{I(\frac{w}{cm^2})}{h \cdot \nu (J)} = \frac{I(\frac{w}{cm^2}) \cdot \lambda (\mu)}{1.24 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} (J)} = \frac{5.10^{18}}{J \cdot \mu m} * I \left(\frac{w}{cm^2} \right) * \lambda (\mu m) \quad (IV.5)$$

Avec

ϕ_0 : Flux lumineux appliqué (photon/s.cm²);

I : Intensité lumineuse (Watt/cm²)

Nous avons utilisé le logiciel SYMBOLS-2000 pour simuler le modèle Bond Graph du capteur BDJ, les valeurs de ses éléments sont données dans le tableau IV.2 [1, 4]. Ce logiciel nous a permis de tracer les courbes des courants I_1 , I_2 , I_3 , I_{ph1} , I_{ph2} , I_{dc1} , I_{dc2} (figure IV.2).

Les photo-courants (I_{ph1} , I_{ph2}) au niveau des deux jonctions sont tracés dans la figure IV-11, alors que les courants I_1 et I_3 sont tracés dans la figure IV.12.

D'après l'équation VI.1, nous avons le courant I_1 est la somme du photo-courant I_{ph1} et du courant d'obscurité I_{dc1} ; ces courants sont tracés dans la figures IV.13

D'après l'équation VI.2, nous avons le courant I_3 est la somme du photo-courant I_{ph2} et le courant d'obscurité I_{dc2} ; ces courants sont tracés dans la figure IV.14.

Le courant I_2 est la somme des deux courants I_1 et I_3 (voir équation IV.3 et figure IV.2); ces trois courants sont tracés sur la figure IV.15.

Eléments	Dans le circuit Electr.	Dans le BG	valeur
Capacité de J_1	C_{j1}	C35	120.10^{-15} Farad
Capacité de J_2	C_{j2}	C36	40.10^{-15} Farad
Tension de polarisation 1	V_1	SE1	0 (Volt)
Tension de polarisation 2	V_2	SE2	3 (Volt)
Tension de polarisation 3	V_3	SE21	0 (Volt)
Conductance J_1	g_{11}	1/R18	9.10^{-12} (1/ Ω)
Conductance J_2	g_{22}	1/R30	1.10^{-12} (1/ Ω)
Transductance J_1	g_{12}	SF20	5.10^{-12} (Ampère/Volt)
Transductance J_2	g_{21}	SF28	7.10^{-12} (Ampère/Volt)
Flux lumineux	I_{ph1}/S_1 et I_{ph2}/S_2	SF44	$5.10^6 * \lambda$ (photon/cm ² .sec)
Photo-courant I_{ph1}	I_{ph1}	F10	(Nano Ampère)
Photo-courant I_{ph2}	I_{ph2}	F25	(Nano Ampère)
Courant I_1	I_1	F1	(Nano Ampère)
Courant I_2	I_2	F2	(Nano Ampère)
Courant $I_3 = I_1 + I_{ph2}$	I_3	F21	(Nano Ampère)
Courant d'obscurité I_{dc1}	I_{dc1}	F5	(Nano Ampère)
Courant d'obscurité I_{dc2}	I_{dc2}	F23	(Nano Ampère)

Tableau IV.2 Eléments dans le circuit électrique équivalent et dans le modèle Bond Graph du capteur optique BDJ

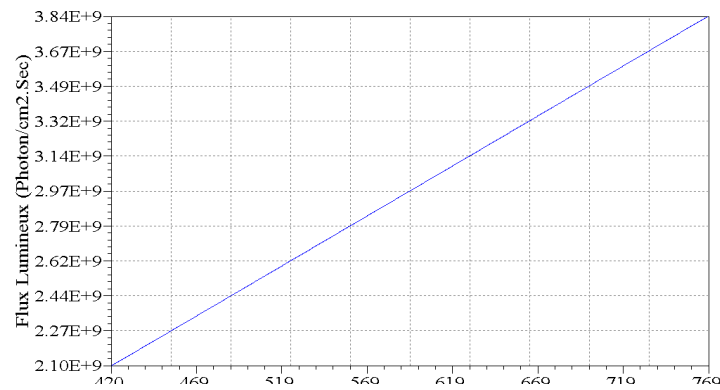


Figure IV.9 Flux lumineux appliqué au capteur optique BDJ
(Tracé avec le logiciel SYMBOLS-2000)

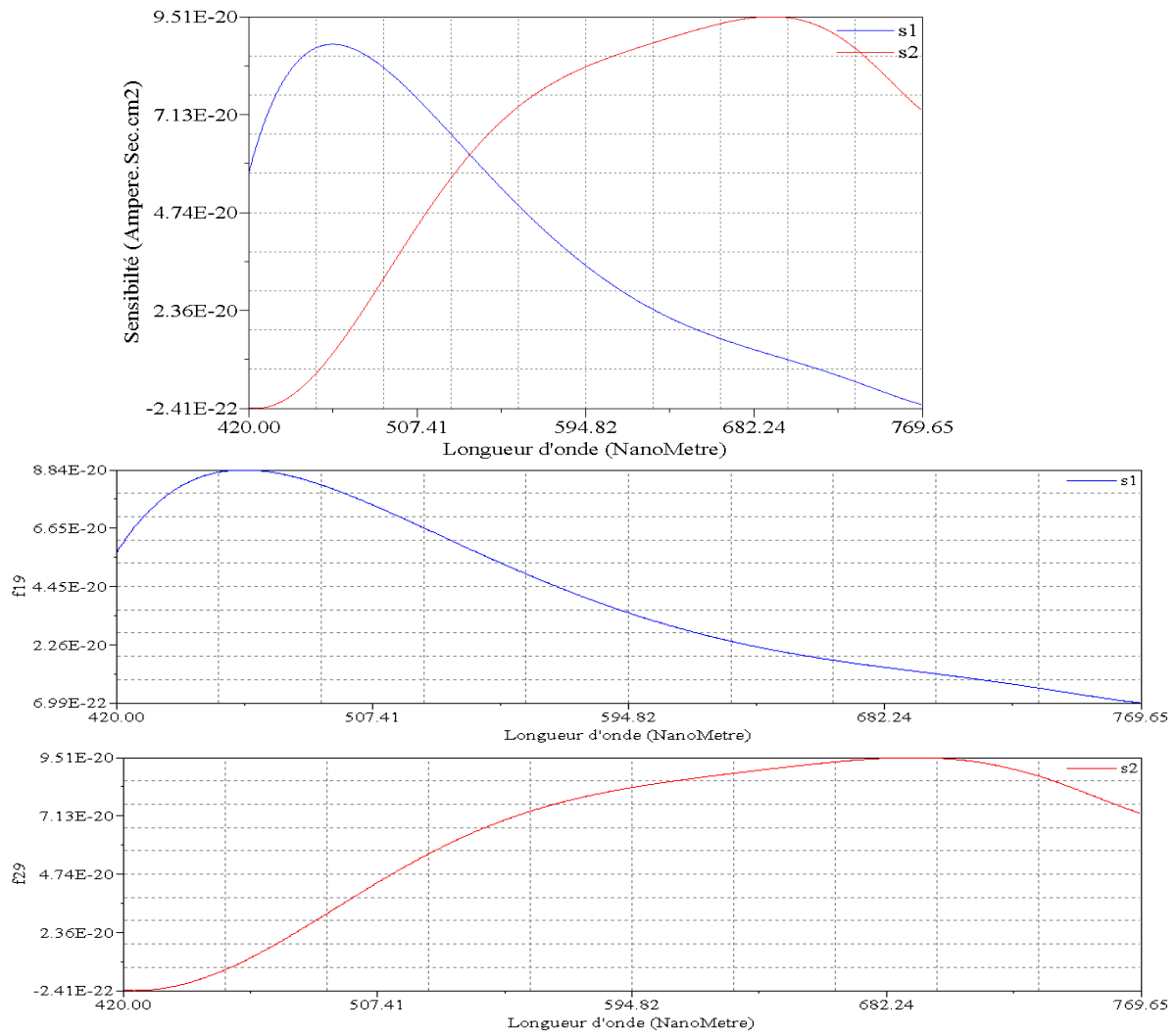


Figure IV.10 Sensibilités S₁ et S₂ des deux jonctions du capteur optique BDJ
(Tracés avec le logiciel SYMBOLS-2000)

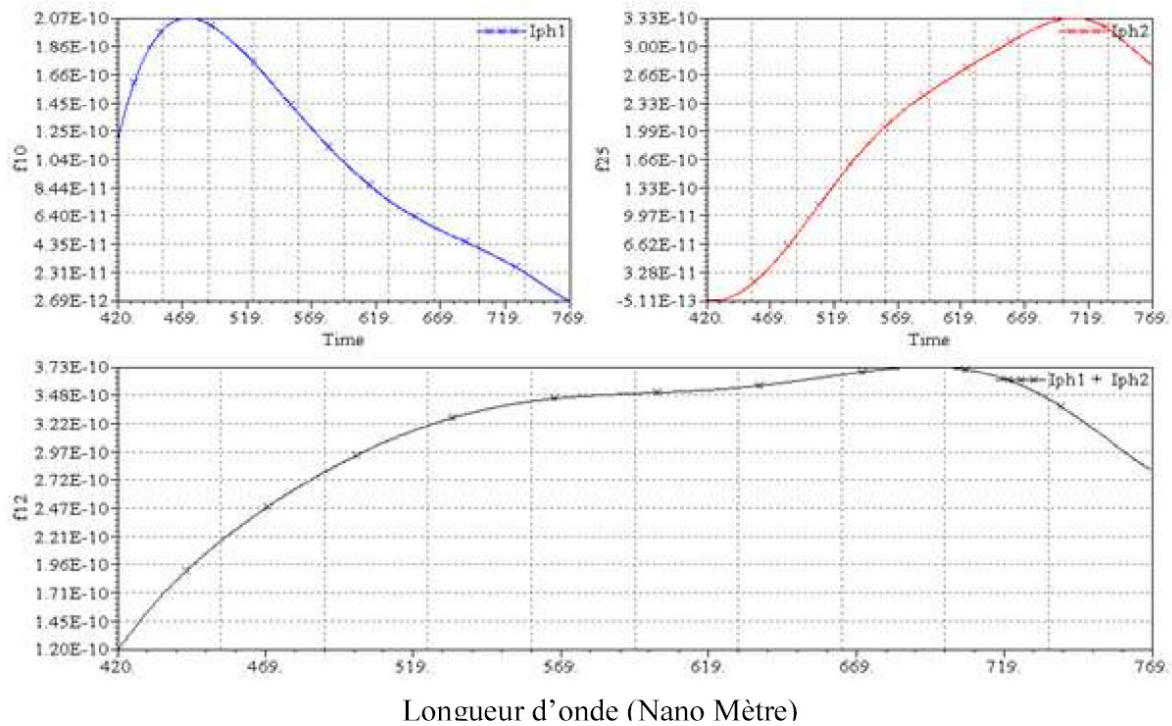
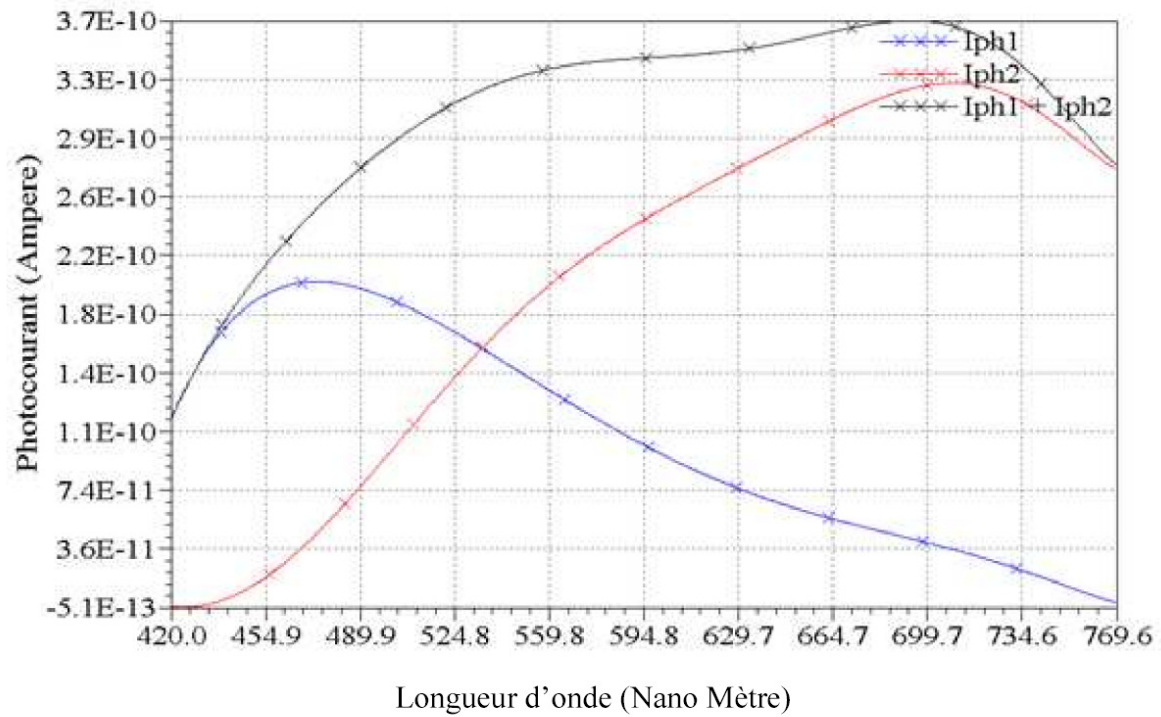


Figure IV.11 Photo-courants I_{ph1} et I_{ph2} au niveau des deux jonctions dans le capteur optique BDJ (Tracés avec le logiciel SYMBOLS-2000)

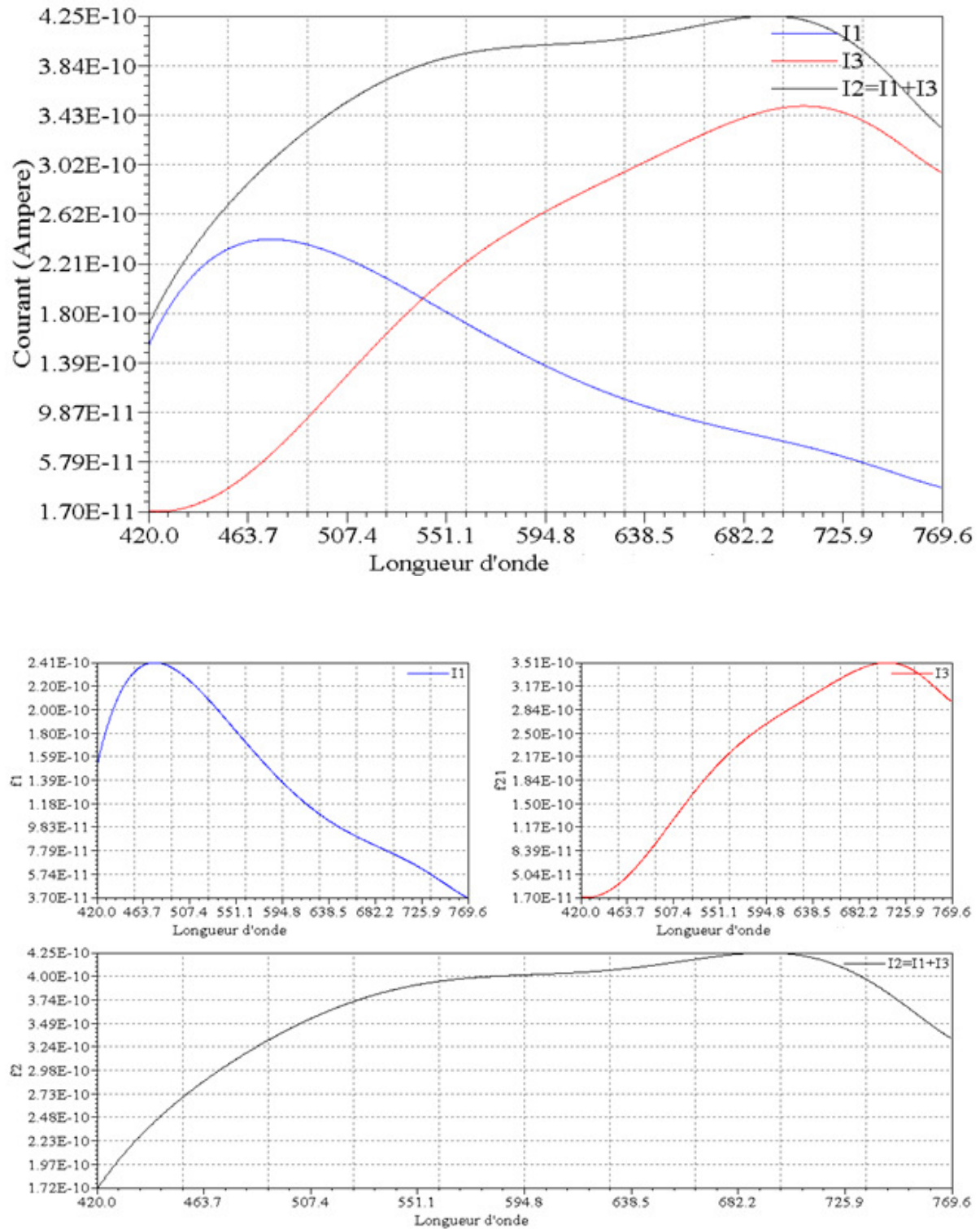


Figure IV.12 Courants I_1 et I_3 du capteur optique BDJ
(Tracés avec le logiciel SYMBOLS-2000)

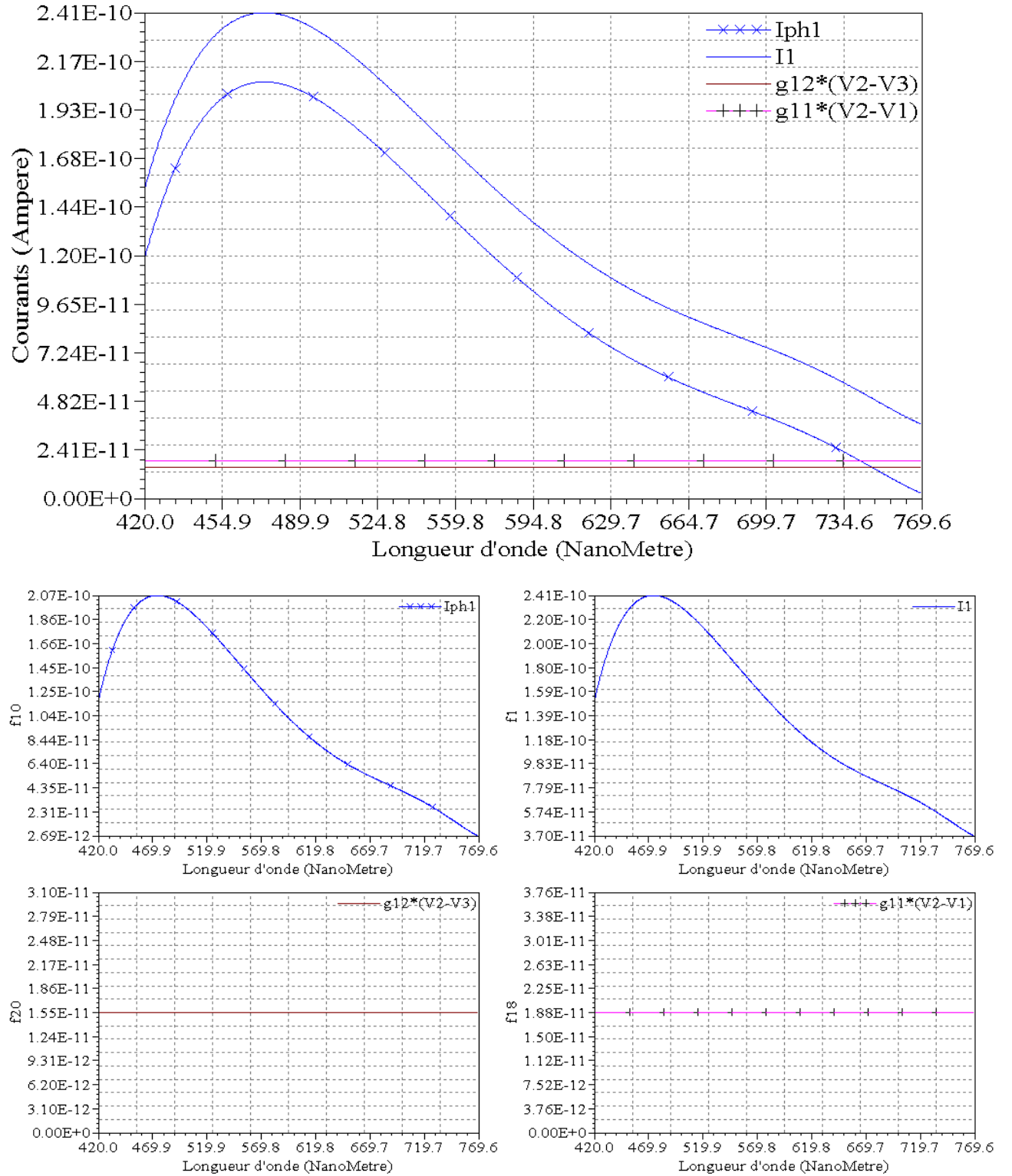


Figure IV.13 Photo-courant I_{ph1} , courant d'obscurité I_{dc1} et courant I_1 ($I_1 = I_{ph1} + I_{dc1}$) dans le capteur optique BDJ

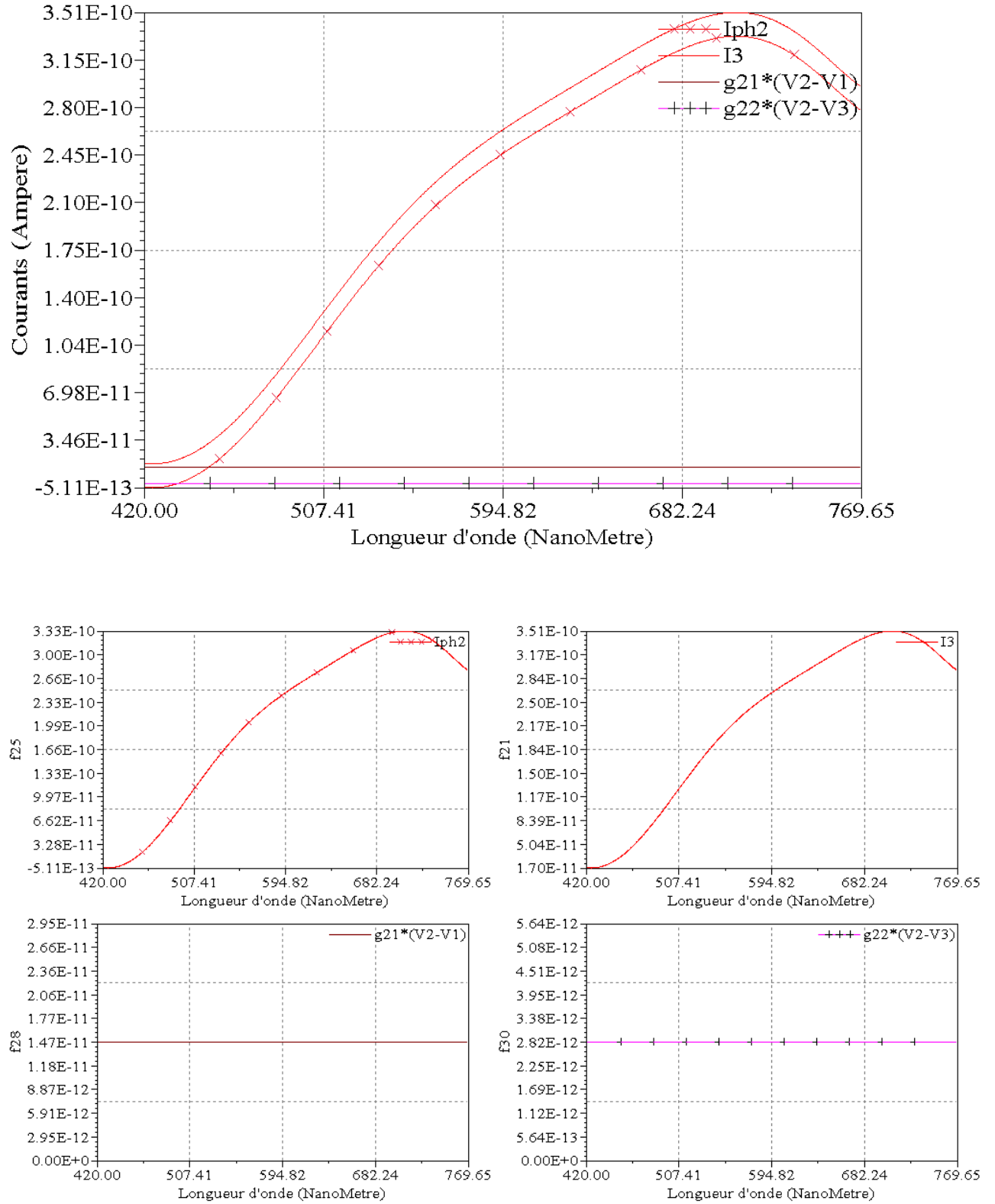


Figure IV.14 Photo-courant I_{ph2} , courant d'obscurité I_{dc2} et courant I_3 ($I_3 = I_{ph2} + I_{dc2}$) dans le capteur optique BDJ

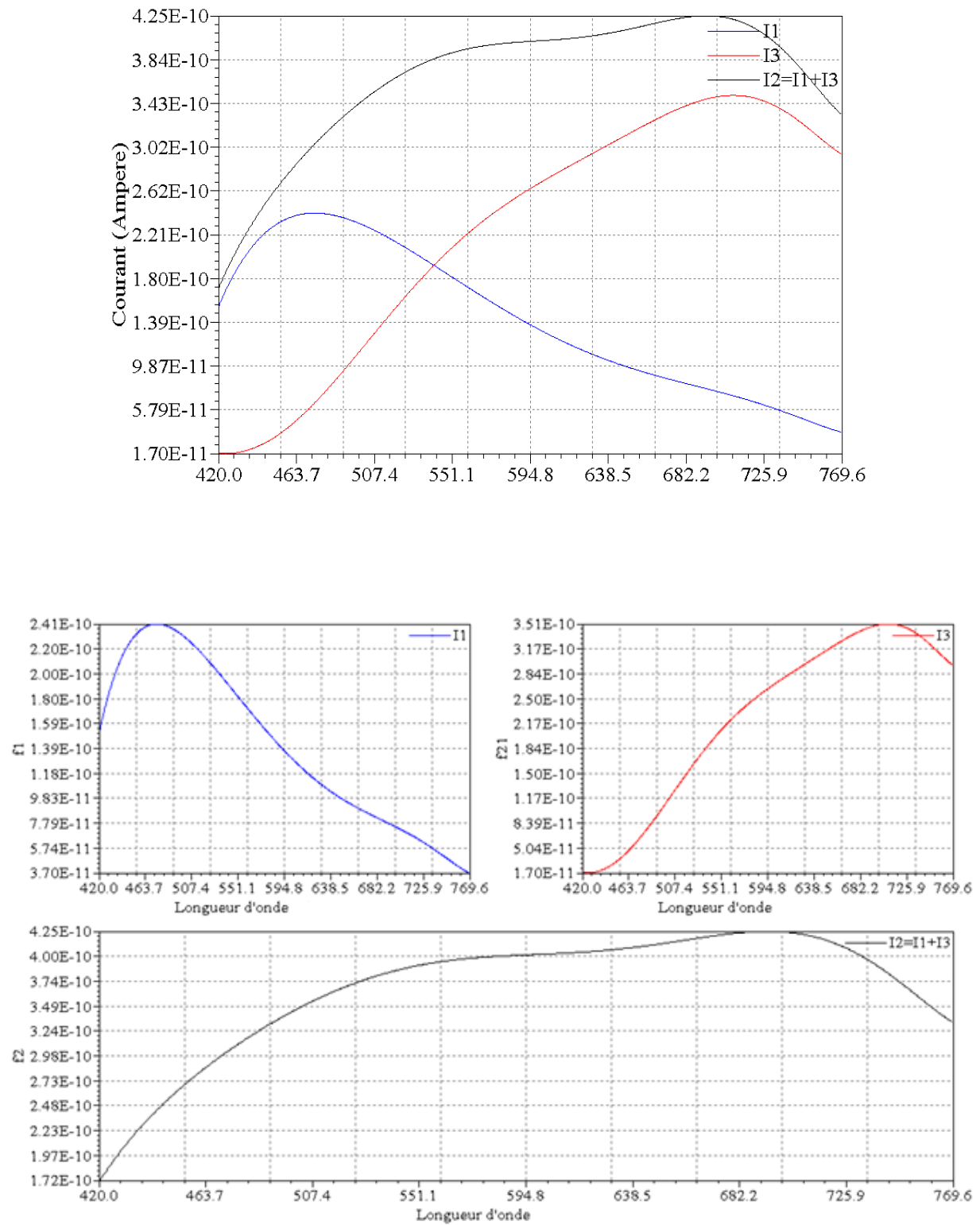


Figure IV.15 Courants I_1 , I_2 et I_3 du capteur optique BDI
(Tracés avec le logiciel SYMBOLS-2000)

IV.4 Modélisation avec Bond Graph du capteur optique BTJ

De même que pour le capteur optique BDJ, on peut donner le circuit électrique équivalent « pour petits signaux » (Figure IV.17) du capteur optique BTJ (Figure IV.16); ce circuit est utilisé pour tracer le modèle Bond Graph du BTJ (Figure IV.18).

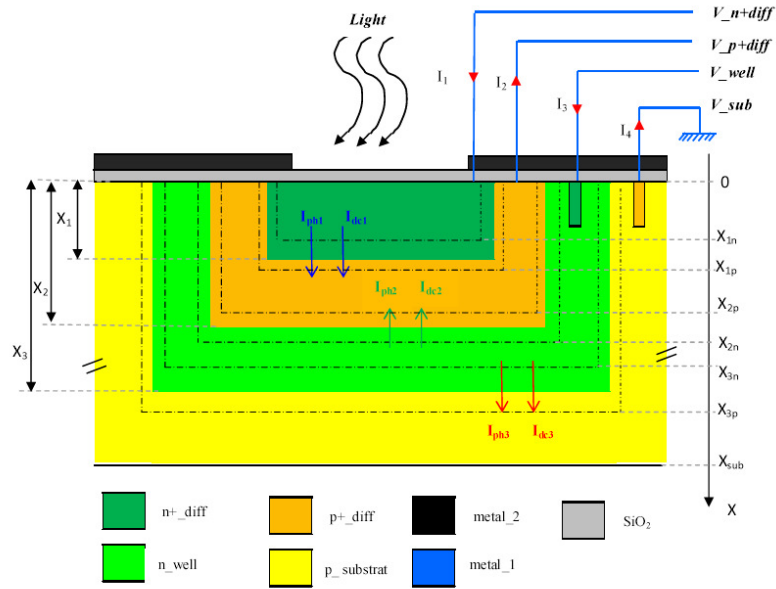


Figure IV.16 Coupe transversale du capteur optique BTJ

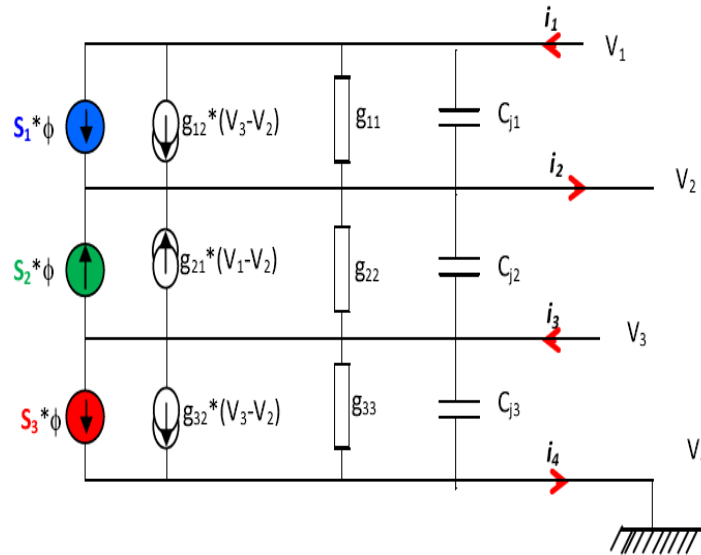


Figure IV.17 Circuit électrique équivalent du capteur optique BTJ pour petit signaux

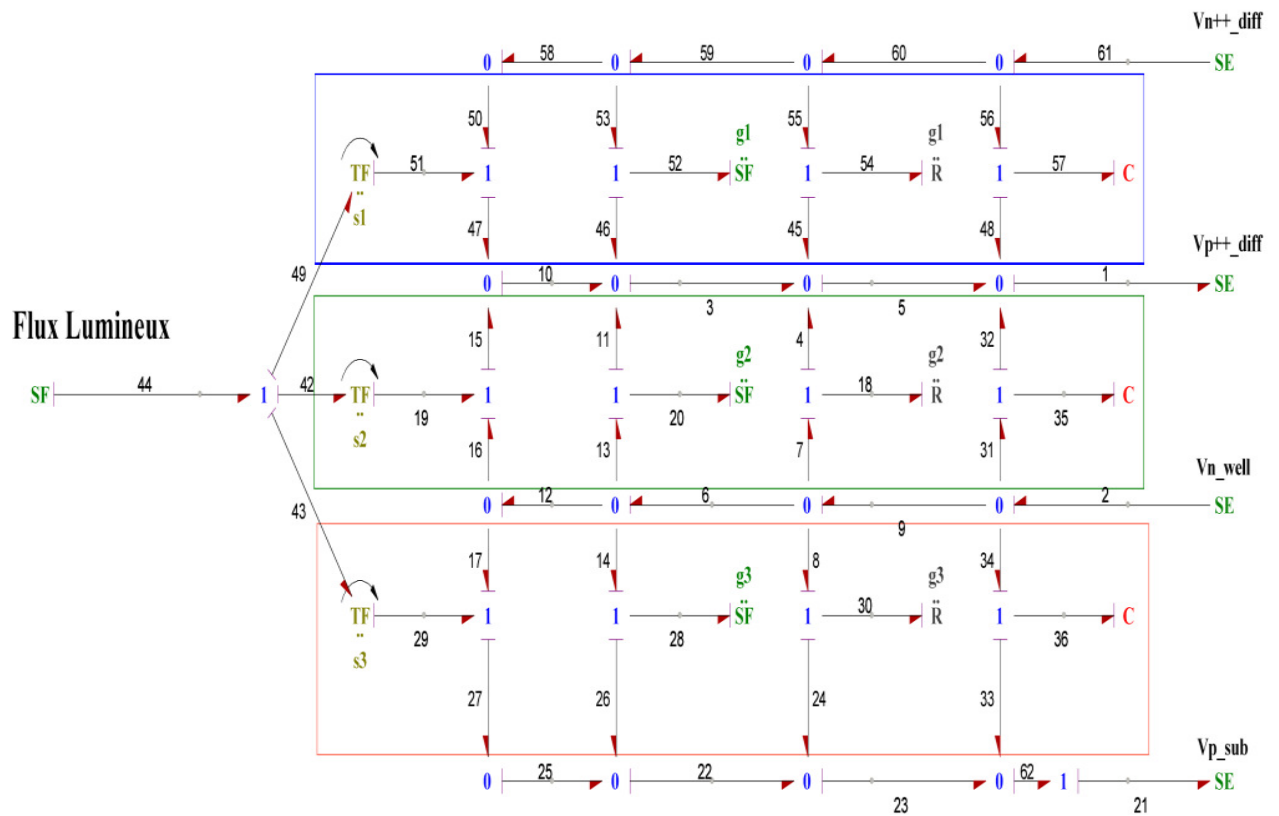


Figure IV.18 Modèle Bond graph du capteur optique BTJ pour petit signaux

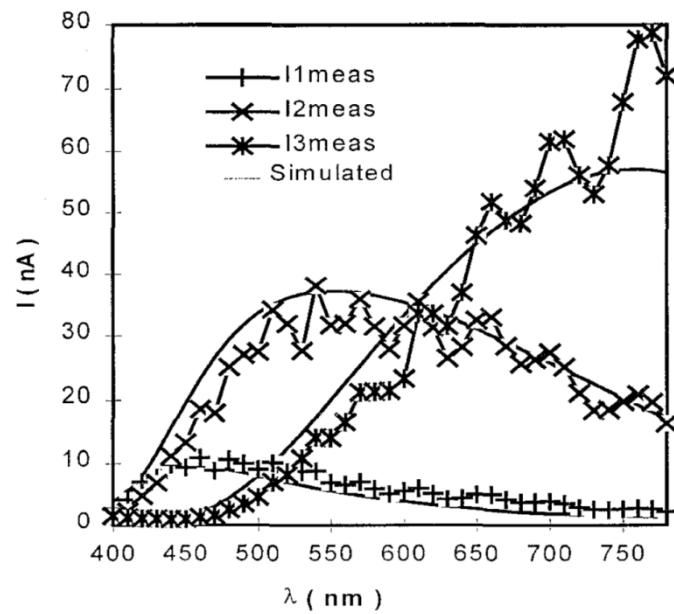


Figure IV.19 Réponses spectrale du capteur optique BTJ (mesurées et simulées) [6]

La réponse spectrale du capteur optique BTJ (mesuré et simulé) est représentée sur la figure IV.19 [6].

La simulation du modèle Bond Graph (Figure IV.18) avec SYMBOLS-2000 nous a permis de tracer les réponses spectrales suivantes:

- Les sensibilités S_1 , S_2 et S_3 (figure IV.20),
- Les photo-courants I_{ph1} , I_{ph2} et I_{ph3} (Figure IV-21)
- Les courants d'obscurité I_{dc1} , I_{dc2} et I_{dc3} (Figure IV-22)
- Les courants I_1 , I_2 et I_3 (Figure IV-23)

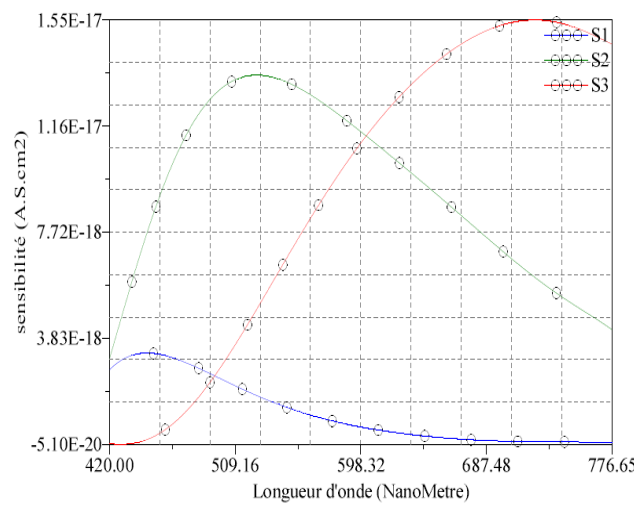


Figure IV.20 Sensibilités (S_1 , S_2 , S_3) des trois jonctions du capteur optique BTJ (Tracé avec SYMBOLS-2000)

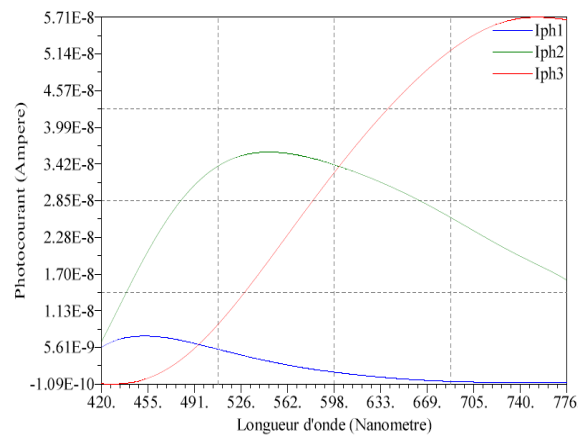


Figure IV.21 Photo-courants du capteur optique BTJ (Tracés avec SYMBOLS-2000)

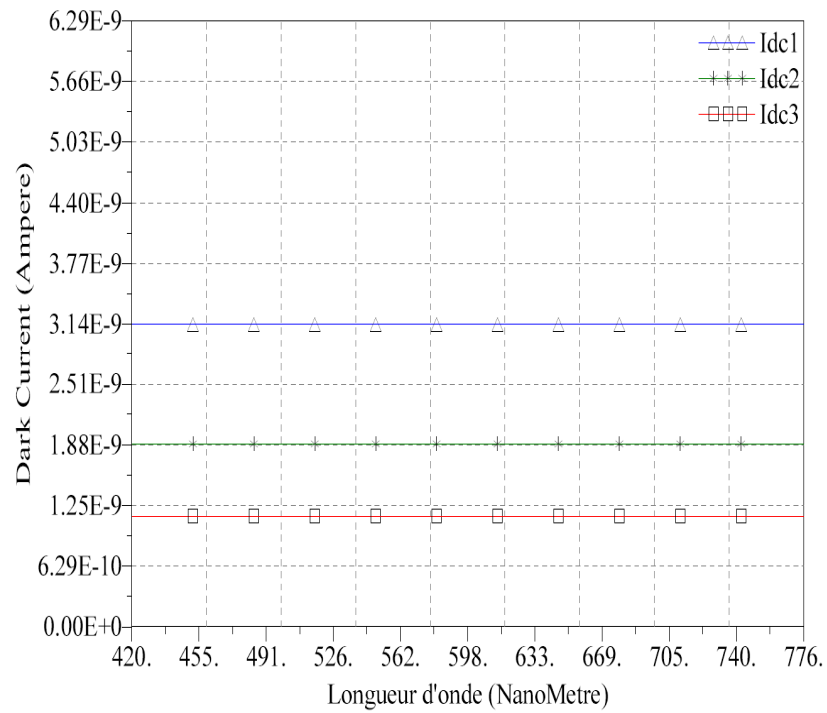


Figure IV.22 Courants d'obscurité (I_{dc1} , I_{dc2} , I_{dc3}) du capteur optique BTJ (Tracés avec SYMBOLS-2000)

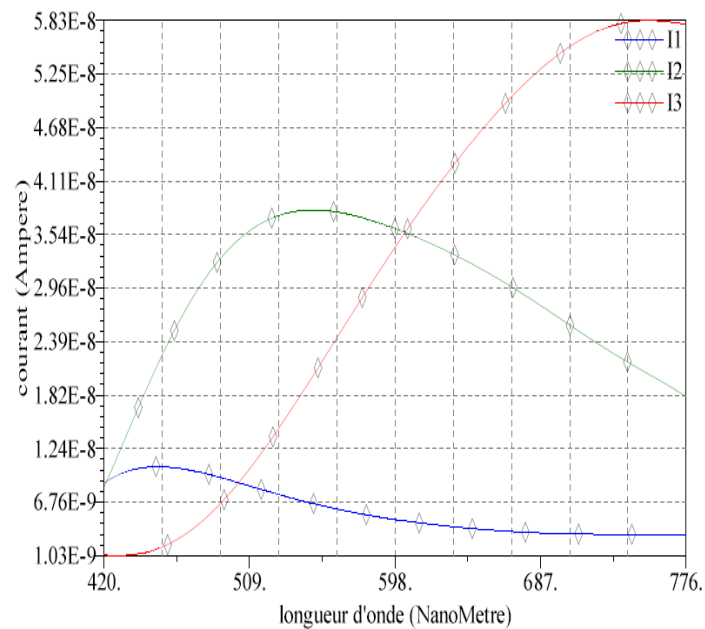


Figure IV.23 Courants mesurés (I_1 , I_2 , I_3) du capteur optique BTJ (Tracés avec SYMBOLS-2000)

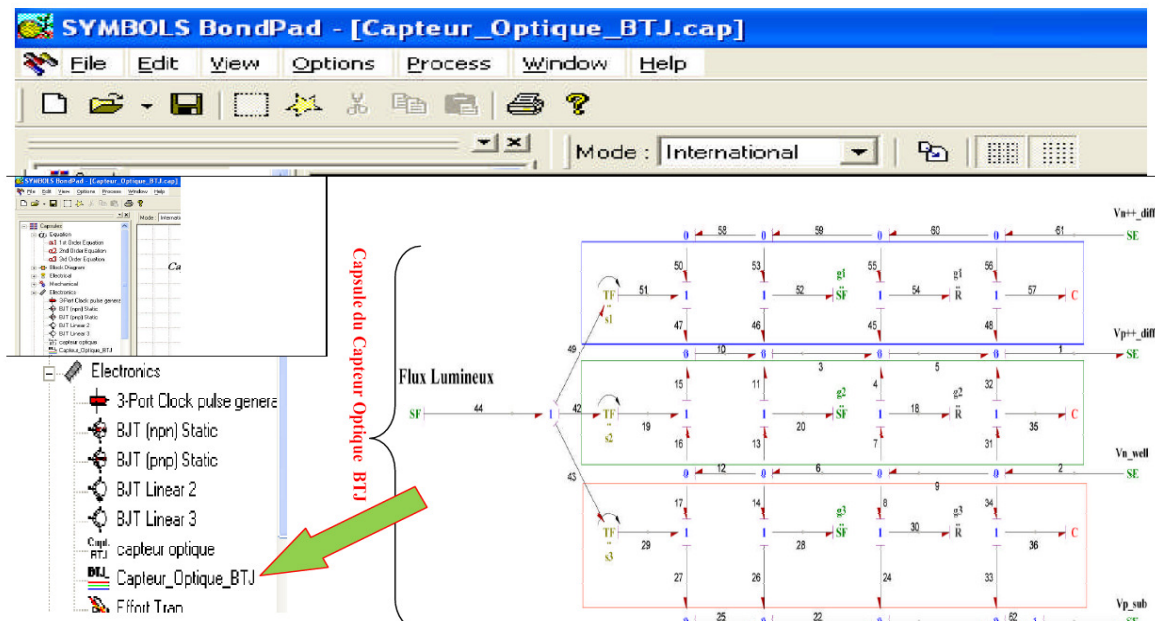


Figure IV.24 Insertion du capteur optique BTJ sous forme de capsule dans la bibliothèque du SYMBOLS-2000

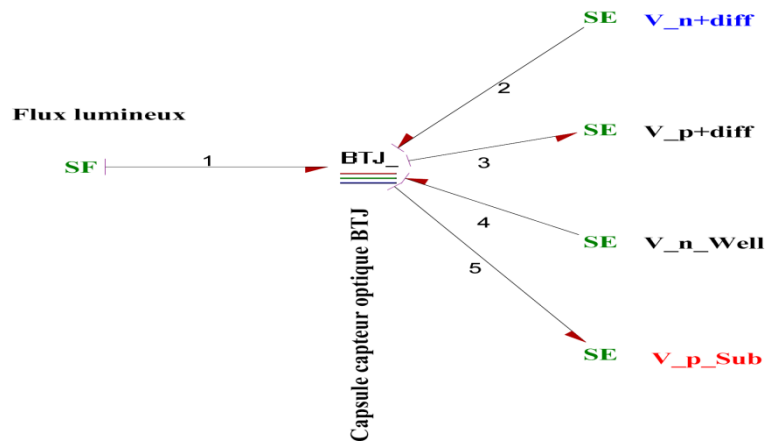


Figure IV.25 Capsule du capteur optique BTJ soumis à un flux lumineux

Note :

On peut mettre le capteur optique BTJ sous forme de capsule et l'insérer dans la bibliothèque des capsules *electronics* du logiciel SYMBOLS-2000 (Figure IV-24), pour être utilisée comme un composant dans d'autres modèles Bond Graph (Figure IV.25).

IV.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la modélisation d'un capteur optique BTJ pour des signaux faibles, l'objectif principal de ce chapitre était l'application du Bond Graph à l'étude et la modélisation comportementale d'un capteur optique BTJ. Cette étude nous a permis de décrire le comportement électrique du capteur sans résoudre numériquement un système d'équations différentielles non linéaire, qui est une tâche très lourde pour les concepteurs des circuits électroniques.

L'outil de modélisation Bond Graph nous permet d'ajuster la réponse spectrale en agissant sur ses différents éléments et d'approcher au plus près de la caractéristique de la réponse désirée.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Au cours des deux dernières décennies, la technologie CMOS a été de plus en plus exploitée pour développer des capteurs optiques intégrés dans les domaines l'Ultra-violet (UV), visible et proche infrarouge (NIR).

Ce mémoire a été consacré à l'étude de capteur optique CMOS d'une structure BTJ (Buried Triple Junction) « triple jonction enterrée ». L'utilisation de la modélisation Bond Graph nous a permis de décrire le comportement du capteur et sa réponse en fonction de la longueur d'onde du flux lumineux appliqué; les photons de longueur d'onde (400-490nm 'couleur bleue') sont détectés au niveau de la première jonction, les photons de longueur d'onde (490-575 nm 'couleur verte') au niveau de la deuxième jonction alors que les photons de longueur d'onde (575-700nm 'couleur rouge') sont détectés au niveau de la troisième jonction (la jonction la plus profonde). Le calcul du rapport des deux courants I_1 et I_3 délivrés par le capteur nous a permis l'identification de la longueur d'onde (couleur) du flux lumineux incident.

Notre objectif principal était la modélisation comportementale d'un capteur optique BTJ pour des signaux faibles. Notre étude était basée sur l'application du modèle Bond Graph à l'étude et la modélisation comportementale du capteur optique BTJ. Cette étude nous a permis de décrire le comportement électrique du capteur sans résoudre numériquement un système d'équations différentielles non linéaire, qui est une tâche très lourde pour les concepteurs des circuits électroniques.

L'utilisation du modèle Bond Graph, avec le circuit électrique équivalent du capteur BTJ, nous a permis de décrire les différents courants (I_1 , I_2 , I_3 , I_{ph1} , I_{ph2} , I_{dc1} , I_{dc2} « courants, photo-courants, courants d'obscurité »), et par conséquent la variation et la commande des différents paramètres du circuit (V_1 , V_2 , V_3 , g_{11} , g_{12} , g_{21} , g_{22}) peuvent être effectuées en temps réel.

Perspectives

Les perspectives de ce travail sont nombreuses; à court terme le plus important est la modélisation du comportement de cette structure dans le régime dynamique pour des tensions

et des fréquences élevées où les effets de la température et les inductances parasites doivent être tenus en compte. Il à noter que l'approche proposée peut être intégrée dans une chaîne d'acquisition réelle en incluant d'autres modules tels que: le milieu de propagation du flux lumineux et le bloc de conditionnement.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] Sylvain Ferruglio, Guo-Neng Lu, Patrick Garda and Gabriel Vasilescu, Review: « *A Review of the CMOS Buried Double Junction (BDJ)* » Sensors, Vol. 8, N.10, pp. 6566-6594, 2008.
- [2] B. Chouikha, G. Sou, and M. Sedjil, "*Colour detection using a buried double p-n junction structure implemented in the CMOS process*," Electronics Letters, Vol.32 , N. 6, pp. 594-596, 1996.
- [3] Khalil JRADI, thèse de doctorat université de Toulouse, « *étude et réalisation de photo-détecteurs de type APD Geiger pixélisés à très haute sensibilité pour l'astronomie gamma Très Haute Energie* », 2010.
- [4] S. Ferruglio, F. Haned, G Vasilescu, M. B. Chouikha, G. Sou, V. Fouad Hanna, G. Alquie, « *A General model of the CMOS Buried Double Junction Photodetector*», Proc. IEEE IST 2004 – International Workshop on Imaging Systems and Techniques, pp. 60-65, Italy, 2004.
- [5] http://fr.wikiversity.org/wiki/Capteur/Capteurs_optiques
- [6] Georges Asch, « *Les capteurs en instrumentation industrielle* », Edition Dunod, Paris, 1999.
- [7] M. B. Chouikha, G. N. Lu, M. Sedjil, G. Sou and G. Alquie, « *Buried triple p-n junction structure in a BiCMOS technology for color detection* », IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, pp 108-111, Minneapolis (USA), 1997.

- [8] M. B. Chouikha, M.B.; Lu, G.N.; Sedjil, M.; Sou, G., “*Colour detection using buried triple pn junction structure implemented in BiCMOS process*”. Electronics Letters, Vol. 34, pp 120-122, 1998.

- [9] Med L. Hafiane, Zohir Dibi and Otto Manck, « *On the Capability of artificial networks to compensate nonlinearities in wavelenth sensing* », sensors, Vol. 9, N.4, pp. 2884-2894, 2009.

- [10] Guy GOUREAUX, « *Physique des composants et dispositifs électroniques* », Edition Masson, Paris, 1994.

- [11] Benard Boittiaux, “*Cours d’électronique, les composants semiconducteurs*”, Edition TEC&DOC, Paris, 1995.

- [12] Henry Mathieu, « *Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques* », Edition Dunod, Paris, 2004.

- [13] Billings Merrill, R.; Brehmer, K, « *Color separation in an active pixel cell imaging array using a triple-well structure* », *US Patent* N° 5.965.875, 1999.

- [14] S. Ferruglio, Victor Fouad Hanna, Georges Alquie, Gabriel Vasilescu, « *Dark current and signal-to-noise ration in BDJ image sensors* », IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 55, N. 6, pp. 1892-1903, 2006.

- [15] Sze, S.M., « *Physics of Semiconductor Devices* », 2nd edition, J. Wiley & Sons: New York, 1981.

- [16] Philippe Fichou, « *Bond graphs : une méthode pluridisciplinaire* », Revue: Technologie N°133, page 37 à 46, 2004.
- [17] Xavier Rboam, « *Le Bond Graph causal : principes et application à la conception systémique* », Rapport de recherche, CNRS, 2005.
- [18] Philippe Fichou, « *Modéliser les systèmes par langage graphique, Éléments de Bond Graph* », Revue: Technologies & Formations, N° 128- page 54 à 67, 2006.
- [19] Geneviève Daphin-Tangy, « *Les bonds graphs et leur application en mécatronique* », Techniques de l'ingénieur, S 7222, 1999.
- [20] A. Alexendre, M. B. Chouikha, M. Sedjil, G. Alquie, « *An improved BDJ photodetector physical model implemented under SPICE* » Proc. MSM, San Diego, CA, Ch. 5, pp. 189-192, 2000.